

Wasserhaushaltsschichten als Bestandteil von Deponieoberflächenabdichtungssystemen

Vom Institutsrat des Internationalen Hochschulinstitutes Zittau
genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Diplom-Ingenieur (FH) für Ökologie und Umweltschutz

Mario Müller

geboren am 24. Juli 1977 in Schlema (Sachsen)

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Martin Hofrichter (IHI Zittau)
Prof. Dr.-Ing. Jürgen I. Schoenherr (Hochschule Zittau/Görlitz)
Prof. Dr. rer. nat. Konrad Miegel (Universität Rostock)
Prof. Dr.-Ing. Franz Sängler (Hochschule Zittau/Görlitz)
PD Dr. rer. nat. habil. Volkmar Dunger (TU Bergakademie Freiberg)

Tag der Verteidigung: 24. Juni 2011

Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt meinen „Doktorvätern“ Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen I. Schoenherr und Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Martin Hofrichter. Danken möchte ich beiden Herren für die Überlassung des Themas, die vielfachen Anregungen, Diskussionen, die konstruktiven Kritiken, für ihr Vertrauen und ihre menschliche sowie freundschaftliche Unterstützung.

Einen sehr großen und sehr herzlichen Dank möchte ich Frau Dr. rer. nat. Christina Seidler und Herrn Dr.-Ing. Said Al-Akel aussprechen. Beide haben mich jederzeit sehr intensiv und detailliert unterstützt. Die ständigen fachlichen und kritischen Diskussionen waren eine unverzichtbare Grundlage für diese Arbeit.

Auch möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Franz Säger danken. Seine permanente Bereitschaft sowie sein wissenschaftlicher und praktischer Erfahrungsschatz waren sehr prägend für diese interdisziplinäre Arbeit und ermöglichen eine sehr gute Überführbarkeit der Ergebnisse in die Praxis.

Ein besonderer Dank richtet sich an Herrn Dr. rer. nat. habil. Volkmar Dunger, der mir mit seiner ausgezeichneten Fachkenntnis bzgl. der Wasserhaushaltsmodellierung sehr geholfen hat.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. (FH) Toni A. Baloun, Herrn Dipl.-Ing. (BA) René Baumert, Herrn M. Sc. Enrico Kammel und Herrn Dipl.-Ing. Matthias Kändler, stellvertretend für alle aktuellen und ehemaligen Kollegen des iTN an der Hochschule Zittau/Görlitz, der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden und dem Internationalen Hochschulinstitut Zittau für ihre engagierte Unterstützung bedanken. Ein großer Dank gilt auch Herrn Dipl.-Ing. Ulrich Pflaumann und Frau Dr. rer. nat. Petra Schneider, die mir immer eine große Hilfe waren.

Für die Finanzierung des Projekts und damit meines Promotionsvorhabens danke ich dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

Der Projektgruppe im Rahmen des Forschungsprojektes „Wasserhaushaltsschichten zur Oberflächensicherung von Deponien und Altablagerungen“ möchte ich ebenso meinen Dank aussprechen.

Allen nicht genannten Helfern bei dieser Arbeit möchte ich gleichfalls danken.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern Frau Annerose Müller (†), Herrn Stephan Müller und meiner Schwester Frau Silvia Müller mit Familie. Ich möchte ihnen sehr herzlich danken, dass sie mich zum Studium führten und mir stets Rückhalt und Geborgenheit gaben.

Meiner Mutter Frau Annerose Müller (†) möchte ich diese Arbeit widmen. Sie hat mich seit meiner Kindheit für die Schönheit der Natur und die Notwendigkeit des Umweltschutzes sensibilisiert. Leider musste Frau Annerose Müller, eine intelligente, fröhliche und liebenswerte Frau und Mutter viel zu früh sterben.

In Gedenken an meine Mutti

Zusammenfassung

Abfallrechtliche Regelwerke definieren die Anforderungen an eine Rekultivierungsschicht, die im Rahmen der Planung und Realisierung eines Deponieoberflächenabdichtungssystems herzustellen ist. Die Deponieverordnung (DepV [2002]) aus dem Jahre 2002 zeigte erstmals Möglichkeiten auf (§14 (6)), wie man z. B. mittels einer Wasserhaushaltsschicht eine Abdichtungskomponente ersetzen kann. Nach dem 01.06.2005 (Ablagerungsverbot für unbehandelte Siedlungsabfälle) stellte der 16.07.2009 die zweite große Zäsur für das Deponierecht in der Bundesrepublik Deutschland dar. Die Verordnung über Deponien und Langzeitlager (DepV [2009]) vom 16.07.2009 löste das bis dahin geltende deponierechtliche Regelsystem ab. Parallel dazu wurden die maßgeblichen abfalltechnischen Verwaltungsvorschriften ersatzlos aufgehoben [DepV, 2009; KAUKE, 2010]. Im nunmehr geltenden Deponierecht werden erstmals definierte Anforderungen (z. B. eine nutzbare Feldkapazität von 220 mm über die gesamte Schichtstärke, mindestens 1,5 m Schichtmächtigkeit) für Wasserhaushaltsschichten ausgewiesen.

Wird das Oberflächenabdichtungssystem ohne Konvektionssperre gebaut, so ist die Funktionalität der Wasserhaushaltsschicht (in Abhängigkeit von der jeweiligen Deponieklasse (DK)) mittels Kontrollfeld nachzuweisen. Für DK I-Deponien ist dabei im 5 jährigen Mittel eine maximale Durchsickerung von 20 mm/a, für DK II-Deponien eine maximale Durchsickerung von 60 mm/a bzw. nicht mehr als 10% vom langjährigen Niederschlagsmittel nachzuweisen (spätestens 5 Jahre nach Herstellung der Wasserhaushaltsschicht).

Werden Wasserhaushaltsschichten unzureichend geplant und eine qualitativ ungenügende Bodenauswahl getroffen, so besteht die Gefahr der Überschreitung o. g. gesetzlicher Durchsickerungsanforderungen nach 5 Jahren. Um das Risiko eines derartigen Versagens zu minimieren, ist ein einfaches und praktikables Instrument notwendig, das bereits im Zuge der Bodenauswahl und der Dimensionierung der Wasserhaushaltsschicht ein fachübergreifendes Arbeiten ermöglicht.

Im Zuge der Planung und Realisierung einer Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht ist eine interdisziplinäre Herangehensweise unabdinglich. Es müssen die geotechnischen, bodenkundlichen und pflanzenspezifischen Aspekte bei der Dimensionierung und Herstellung der Wasserhaushaltsschicht berücksichtigt werden.

An der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz werden seit 11/2007 Messdaten zum Bodenwasserhaushalt, zum Setzungs- und Durchwurzelungsverhalten zweier regional verfügbarer, signifikant unterschiedlicher Böden (mittel toniger Schluff (Ut3) und stark schluffiger Sand (Su4)) in 10 Rundlysimetern und 6 Aufgrabungsfeldern untersucht. Die

Messdaten zum Wasserhaushalt und zu den Setzungen wurden an den Rundlysimetern kontinuierlich und diskontinuierlich gewonnen und gespeichert. Parallele Untersuchungen am Bodenmaterial (z. B. zum Wassergehalt, zur Verdichtung und zum Durchwurzelungsverhalten) wurden anhand von Proben aus den Aufgrabungsfeldern realisiert.

Die Messungen im ausgewerteten Untersuchungszeitraum (11/2007 – 04/2010) verdeutlichen, dass die Funktionalität einer Wasserhaushaltsschicht sehr stark von den Interaktionen im System „Boden – Pflanze“ abhängt. Die Bodenfeuchte- und Saugspannungsmessungen zeigen die bodenartenabhängigen Änderungen des Bodenwasserspeichers im durchwurzelten Bodenbereich. Entsprechend der Bodencharakteristik kann das infiltrierende Niederschlagswasser vor allem im hydrologischen Winterhalbjahr gespeichert und im hydrologischen Sommerhalbjahr den Pflanzen zur Verfügung gestellt werden. Dabei ist bereits im Rahmen der Bodenauswahl und Planung der Wasserhaushaltsschicht auf eine ausreichende nutzbare Feldkapazität (nFK) und Luftkapazität (LK) im durchwurzelten Bodenbereich zu achten. Der pflanzenverfügbare Bodenwasserspeicher im durchwurzelten Bereich muss mindestens eine nFK aufweisen, die der durchschnittlichen Niederschlagsmenge im hydrologischen Winterhalbjahr entspricht. Unter Beachtung der lokalen und regionalen Klimaänderungen war für den Standort Bautzen/Nadelwitz ein pflanzenverfügbarer Bodenwasserspeicher im durchwurzelten Bodenbereich von 300 mm erforderlich. Das bindige Bodenmaterial der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz hat eine nFK von 23 Vol.-% und muss demnach, entsprechend den gesetzlichen Vorgaben aus DepV [2009], mit einer Mächtigkeit von 1,5 m eingebaut werden. Die Gesamtmächtigkeit von 1,5 m des bindigen Bodenmaterials korreliert sehr gut mit der ermittelten Durchwurzelungstiefe eines Gras- / Kräuterbewuchses. Die Untersuchungen an der Lysimeteranlage in Bautzen/Nadelwitz zeigen Durchwurzelungstiefen im bindigen Bodenmaterial im Bereich von 1,2 - 1,5 m u. GOK und im gemischtkörnigen Boden von ca. 0,9 - 1,0 m u. GOK. Deutliche Erhöhungen der Schichtmächtigkeiten über die Durchwurzelungstiefe hinaus bewirken keinen Wirksamkeitszuwachs der Wasserhaushaltsschichten.

Die Dimensionierung der Wasserhaushaltsschicht ist demnach vom lokalen Klima, der Durchwurzelungstiefe des Bewuchses, dem pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeicher, der Bodendichte und dem Schutzbedürfnis ggf. tiefer liegender weiterer Systemkomponenten (z. B. Dichtungsschichten) abhängig.

Die Untersuchungsergebnisse verdeutlichen, dass bei einem Bodeneinbau mit einem Verdichtungsgrad von ca. 90% - 92%, keine signifikanten Setzungs- und Hebungerscheinungen zu erwarten sind und die geforderten bodenkundlichen (nFK und LK) und bodenmechanischen (stabiles Korngerüst und ausreichende Scherfestigkeit) Parameter eingehalten werden können. Dies stellt einen deutlichen ökonomischen und zeitlichen Vorteil gegenüber dem sehr lockeren Einbau dar und ist mit herkömmlichen Einbautechniken

realisierbar. Die Untersuchungsergebnisse an der Lysimeterstation Bautzen/Nadelwitz zeigen auf, dass die langzeitstabile Funktionalität einer Wasserhaushaltsschicht nur durch eine interdisziplinäre Arbeitsweise bei der Planung und Herstellung gewährleistet werden kann.

Um eine fachübergreifende Bearbeitung bereits im Zuge der Bodenauswahl und der Festlegung von Einbaukriterien in einfacher Art und Weise realisieren zu können, ist die Nutzung des interdisziplinären Ansatzes auf Basis des Feinbodenartendiagramms nach KA5 [AG BODEN, 2005] und dem Dreieck der Phasenzusammensetzung nach RUDERT [1977] ein geeignetes Hilfsmittel. Die Erweiterung des Feinbodenartendiagramms mit den Ebenen „Nutzbare Feldkapazität“, „Durchwurzelung“ und „Standicherheit“ ermöglicht eine gezielte Bewertung regional verfügbarer Böden auf Grundlage von einfach bestimmbar Bodenparametern. Anhaltswerte zur Abschätzung des pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeichers, den zu erwartenden Durchwurzelungstiefen und der Standicherheit können damit abgeleitet werden. Die vorgestellten Arbeitsweisen zur Abschätzung der Eignung von Böden als Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht ersetzen aber keine eventuell noch nötigen standortabhängigen Detailuntersuchungen bzw. -planungen.

Auf Basis der Charakteristik des ausgewählten Bodens lassen sich, unter Nutzung des Dreiecks der Phasenzusammensetzung nach RUDERT [1977], die Einbauparameter (Trockendichte und Wassergehalt) festlegen. Dabei erweist es sich als sinnvoll, dass keine konkret feststehenden Kenngrößenbereiche ausgewiesen werden. Die Einhaltung dieser Kenngrößen ist in der Regel bei der Herstellung von Wasserhaushaltsschichten nur sehr schwer in der Praxis umzusetzen und zu überprüfen. Die Definition von Spannbreiten für die entsprechenden Einbaukennwerte ermöglicht dagegen eine qualitätsoptimierte Herstellung und Prüfung einer Wasserhaushaltsschicht.

Der interdisziplinäre Ansatz zur Planung und Herstellung von Wasserhaushaltsschichten stellt einen weiteren wesentlichen Baustein für die langzeitstabile Oberflächenabdichtung von Deponien dar und erlaubt die Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen nach DepV [2009]. Der hier vorgestellte fachübergreifende Ansatz ermöglicht gleichfalls die Anwendung bei der Planung von anderen Rekultivierungs- und Oberflächenabdichtungs- bzw. -sicherungsarbeiten (z. B. Altlasten, Altablagerungen). Weitere Einsatzgebiete stellen u. a. die Rekultivierung von Tagebaugebieten und die Herstellung von Straßendämmen aber auch die Auswahl von geeigneten Oberböden für Wasserbauwerke (Hochwasserschutz) dar.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Abkürzungs-und Symbolverzeichnis

1	Einleitung und Zielstellung	18
2	Oberflächenabdichtung von Deponien und Altablagerungen	20
2.1	Rechtliche Grundlagen	20
2.2	Der Wasserhaushalt von Oberflächenabdichtungssystemen - Stand von Wissenschaft und Technik	23
2.2.1	Der Wasserhaushalt einer Wasserhaushaltsschicht	24
2.2.2	Anforderungen und Ziele an eine Wasserhaushaltsschicht	26
2.2.3	Dimensionierung einer Wasserhaushaltsschicht	29
2.2.4	Anforderungen an den Bewuchs auf Wasserhaushaltsschichten	31
2.2.5	Bodenkundliche Anforderungen an Wasserhaushaltsschichten	32
2.2.6	Einbauverfahren zur Herstellung von Wasserhaushaltsschichten	35
2.2.7	Qualitativer Einfluss biotischer Einflussfaktoren auf Wasserhaushaltsschichten	36
3	Experimentelle Untersuchungen	37
3.1	Untersuchungsmaßstab	37
3.2	Standortbeschreibung	38
3.3	Klimacharakteristik	38
3.3.1	Lokale Klimacharakteristik	38
3.3.2	Allgemeine Trends der Klimaentwicklung	42
3.4	Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	43
3.4.1	Rundlysimeter und Aufgrabungsfelder	43
3.4.2	Charakterisierung des Oberbodenmaterials	48
3.4.3	Charakterisierung des bindigen Bodens	51
3.4.4	Charakterisierung des gemischtkörnigen Bodens	53
3.4.5	Bodeneinbau	56
3.4.6	Messtechnische Instrumentierung	58
3.4.7	Vegetation/Bewuchs	62
4	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	62
4.1	Bodenmechanik	62
4.1.1	Setzungsmessungen	63
4.1.2	Aufgrabungsuntersuchungen	63
4.2	Wasserhaushalt	66
4.2.1	Bodenfeuchte	66
4.2.2	Saugspannung (Matrixpotenzial)	72
4.2.3	Sickerwasser	74
4.3	Vegetation	78
4.3.1	Gesamtdeckungsgrad	79
4.3.2	Durchwurzelungscharakteristik	81
4.3.3	Evapotranspiration	83
4.4	Systemwirksamkeiten	87

4.5	Wasserhaushaltsmodellierung - BOWAHALD	91
5	Interdisziplinärer methodischer Ansatz	97
5.1	Feinbodenartendiagramm nach KA5 bzw. DIN 4220	99
5.1.1	Ebene „Nutzbare Feldkapazität“	101
5.1.2	Ebene „Durchwurzelung“	104
5.1.3	Ebene „Standicherheit“	116
5.2	Nutzung des Dreiecks der Phasenzusammensetzung nach RUDERT	123
5.2.1	Aufbau des Dreiecks der Phasenzusammensetzung	124
5.2.2	Anpassung des Dreiecks der Phasenzusammensetzung nach RUDERT für Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten	126
6	Schlussfolgerung	128
	Quellenverzeichnis	
	Eidesstattliche Erklärung	
	Anlagen	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zeitliche Entwicklung des Abfallrechts auf verschiedenen Rechtsebenen [PFEIFFER, 2006, verändert]	18
Abbildung 2:	Wasserhaushaltskomponenten eines Oberflächenabdichtungssystems [HAUBRICH & WATTENDORF, 2002, verändert]	24
Abbildung 3:	Bodenwasservorrat im Jahresverlauf [LANUV NRW, 2010, verändert]	25
Abbildung 4:	Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehung bei Sand, Schluff und Ton [SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002]	26
Abbildung 5:	Beispiel für ein Oberflächenabdichtungssystem aus Kunststoffdichtungsbahn und Wasserhaushaltsschicht [MAIER-HARTH et al., 2005; verändert]	28
Abbildung 6:	Eignung von Böden für die Rekultivierungsschicht einer Deponieoberflächenabdichtung auf Basis der Körnungszusammensetzung [KONOLD et al., 2004]	35
Abbildung 7:	Klimadiagramm nach WALTER und LIETH für den Standort Görlitz (1961-1990) [DWD, 2010]	39
Abbildung 8:	Vergleich der mittleren monatlichen Niederschlagsmengen am Standort Bautzen/Kubschütz für die Zeiträume 1961-1990 und 1991-2009	40
Abbildung 9:	Temperaturverlauf für den Standort Görlitz in unterschiedlichen Zeiträumen	41
Abbildung 10:	Grundriss der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz (nicht maßstabsgerecht)	43
Abbildung 11:	Schachtunterteil mit einbetonierter GFK-Schale der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	44
Abbildung 12:	Aufgesetzte Stahlbetonschacht-ringe der Rundlysimeter in Bautzen/Nadelwitz	44
Abbildung 13:	Bodeneinbau in die Aufgrabungsfelder der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	45
Abbildung 14:	Aufbau der Bodensäulen in den Lysimetern (ohne untere Entwässerungsschicht) der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	46
Abbildung 15:	Beregnung auf den Aufgrabungsfeldern (links) und dem Rundlysimeter (rechts) der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	47
Abbildung 16:	Vertikalschnitt durch die Rundlysimeter 2 (links) und 6 (rechts)	47
Abbildung 17:	Detailansicht des Oberbodens für die Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	48
Abbildung 18:	Körnungslinie des Oberbodens in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	49
Abbildung 19:	Plastizitätsdiagramm des Oberbodens (grün) und des bindigen Bodens (gelb) in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz nach CASAGRANDE [SCHOENHERR et al., 2011; verändert]	49
Abbildung 20:	Kapillarspannungs-Sättigungs-Beziehung des Oberbodens in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz [DÖRING, 2007]	50
Abbildung 21:	Detailansicht des bindigen Bodens in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	51
Abbildung 22:	Körnungslinie des bindigen Bodens in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	51
Abbildung 23:	Kapillarspannungs-Sättigungs-Beziehung des bindigen Bodens in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	52
Abbildung 24:	Detailansicht des gemischtkörnigen Bodens in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	53
Abbildung 25:	Körnungslinie des gemischtkörnigen Bodens in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	54
Abbildung 26:	Kapillarspannungs-Sättigungs-Beziehung des gemischtkörnigen Bodens in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	55
Abbildung 27:	Messwerte der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	59

Abbildung 28: Messwarte mit Datenloggersystem und Kippzähler	59
Abbildung 29: Niederschlagsmesser an der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	59
Abbildung 30: Klimastation auf der Deponie Bautzen/Nadelwitz	59
Abbildung 31: Einbau des Extensometers in die Rundlysimeter der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	61
Abbildung 32: Seitenansicht des eingebauten Extensometers [FREUDENREICH, 2007]	61
Abbildung 33: Wassergehalte in den einzelnen Probenahmetiefen zu unterschiedlichen Zeitpunkten an den Aufgrabungsfeldern 1a (bindiger Boden, links) und 9a (gemischtkörniger Boden, rechts) von 10/2007 – 04/2010	64
Abbildung 34: Wassergehaltsbestimmungen in den Aufgrabungsfeldern 1a, 3a, und 10a (bindiger Boden (BB); links) und in den Aufgrabungsfeldern 5a, 8a, und 9a (gemischtkörniger Boden (GB); rechts) aus der 4. Aufgrabung (05/2009)	65
Abbildung 35: Bodenfeuchteverlauf im Lysimeter 1 (3 m, bindiger Boden) in der Tiefe von 0 - 1,0 m u. GOK	67
Abbildung 36: Bodenfeuchteverlauf im Lysimeter 1 (3 m, bindiger Boden) in der Tiefe von 2,0 - 3,0 m u. GOK	67
Abbildung 37: Bodenfeuchteverlauf im Lysimeter 9 (3 m, gemischtkörniger Boden) im Bereich 0 - 1,0 m u. GOK	68
Abbildung 38: Bodenfeuchteverlauf im Lysimeter 9 (3 m, gemischtkörniger Boden) im Bereich 1,0 - 2,0 m u. GOK	70
Abbildung 39: Bodenfeuchteverlauf im Lysimeter 9 (3 m, gemischtkörniger Boden) im Bereich 2,0 - 3,0 m u. GOK	70
Abbildung 40: Vergleich des Bodenfeuchteverlaufes über die Profiltiefe von Lysimeter 9 (3 m, gemischtkörniger Boden) für einen relativ trockenen Zeitraum (12.09. - 15.09.2008) und einen relativ nassen Zeitraum (21.11. - 25.11.2008)	72
Abbildung 41: Verlauf der Saugspannungen in den Lysimetern 3 (2 m, bindiger Boden, Beregnung), Lysimeter 4 (1 m, bindiger Boden), Lysimeter 5 (2 m, gemischtkörniger Boden, Beregnung), Lysimeter 8 (1,6 m, gemischtkörniger Boden) und Lysimeter 10 (1,6 m, bindiger Boden)	73
Abbildung 42: Kumulative Niederschlags- und Sickerwassermengen der Lysimeter mit bindigen Böden	75
Abbildung 43: Kumulative Niederschlags- und Sickerwassermengen der Lysimeter mit gemischtkörnigem Boden	76
Abbildung 44: Prozentuale Sickerwassermengen der Lysimeter bezogen auf die Niederschlagsmenge an der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz im Zeitraum 11/2007 - 04/2010	77
Abbildung 45: Vergleich der jährlichen Sickerwassermengen der Lysimeter bezogen auf die Niederschlagsmenge mit den Vorgaben der DepV [2009] an der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz in den hydrologischen Jahren 2008 - 2010 (in 2010 nur das hydrologische Winterhalbjahr (WHJ)) im Zeitraum 11/2007 - 04/2010	78
Abbildung 46: Gesamtdeckungsgrade auf den Untersuchungsflächen der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz im Jahre 2009	79
Abbildung 47: Gesamtdeckungsgrade auf den Untersuchungsflächen der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz im Jahre 2010	80
Abbildung 48: Teufenbezogene Wurzel trockenmassen [%] aus den Aufgrabungsfeldern (Probenahme: Oktober 2009)	82
Abbildung 49: Verdunstung ausgewählter Lysimeter der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz im Vergleich zur Verdunstung des Lysimeters ZÖF (Zittau) und der Gras-Referenz-verdunstung im hydrologischen Jahr 2007/08	85

Abbildung 50: Verdunstung ausgewählter Lysimeter der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz im Vergleich zur Verdunstung des Lysimeters ZÖF (Zittau) und der Gras-Referenz-verdunstung im hydrologischen Jahr 2008/09	86
Abbildung 51: Wirksamkeiten der Wasserhaushaltsschichten der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz in Abhängigkeit vom Niederschlag für den Zeitraum 11/2007 - 04/2010	87
Abbildung 52: Wirksamkeiten der Lysimeter der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz in Abhängigkeit von der Schichtmächtigkeit im hydrologischen Winterhalbjahr 2009	89
Abbildung 53: Wirksamkeiten der Lysimeter der Lysimeterstation Bautzen/Nadelwitz in Abhängigkeit der Schichtmächtigkeit im hydrologischen Sommerhalbjahr 2010	89
Abbildung 54: Monatliche Verdunstung, monatlicher Niederschlag und die Klimatische Wasserbilanz (KWB) in 2008 an der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	90
Abbildung 55: Monatliche Verdunstung, monatlicher Niederschlag und die KWB in 2009 an der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	90
Abbildung 56: Erläuterung des Darcy-Gesetzes [HÖLTING & COLDEWEY, 2005, verändert]	92
Abbildung 57: Feinbodenartendiagramm nach KA5 [AG Boden, 2005]	100
Abbildung 58: Darstellung der Ebene „Nutzbare Feldkapazität“ im Feinbodenartendiagramm (Abhängigkeit von der Korngrößenzusammensetzung und exemplarisch im Bereich von $1,4 \leq \rho_d < 1,6 \text{ g/cm}^3$)	103
Abbildung 59: Methodischer Ansatz zur Ermittlung der effektiven Durchwurzelungstiefe [DUNGER, 2007, verändert]	104
Abbildung 60: Ebene „Durchwurzelung“ für die Gras-/Kräuter-Saatgutmischung A - Klassifizierung der Durchwurzelungstiefe W_p in Abhängigkeit von der Feinbodenart	110
Abbildung 61: Ebene „Durchwurzelung“ für die Straucharten – Klassifizierung der Durchwurzelungstiefe W_p in Abhängigkeit von der Feinbodenart	112
Abbildung 62: Ebene „Durchwurzelung“ für den Bewuchs „Nadelbaum“ – Klassifizierung der Durchwurzelungstiefe W_p in Abhängigkeit von der Feinbodenart	115
Abbildung 63: Ebene „Durchwurzelung“ für den Bewuchs „Laubbaum“ – Klassifizierung der Durchwurzelungstiefe W_p in Abhängigkeit von der Feinbodenart	115
Abbildung 64: Kräfteansatz und Kraftdreieck zur grafischen Standsicherheitsberechnung bei einer ebenen Gleitfläche auf Basis der Auflast (p), der Eigengewichtskraft (G), der Gleitflächen (A - B), der Resultierenden aus den Normalspannungen (N'), der Reibungskraft (R_e), der Kohäsion (c), dem Porenwasserdruck (u), dem Reibungswinkel (ϕ) und dem Neigungswinkel der Gleitfläche (β) [PRINZ & STRAUß, 2006]	121
Abbildung 65: Ebene „Standsicherheit“ für spezifische Randbedingungen auf der Basis unterschiedlicher Körnungszusammensetzungen	123
Abbildung 66: Grafische Darstellung des Dreiphasensystems „Boden“ [AL-AKEL et al., 2007]	124
Abbildung 67: Darstellung des Prinzips der Volumenverhältnisse der Bodenphasen im Dreiecksnetz [RUDERT, 1977]	125
Abbildung 68: Integration der Proctorkurve sowie des Wasserrückhaltevermögens des bindigen Bodens in das Dreieck der Phasenzusammensetzung nach RUDERT [1977]	127
Abbildung 69: Integration weiterer bodenspezifischer Kennwerte (LK , w_s) in das Dreieck der Phasenzusammensetzung nach RUDERT [1977]	127
Abbildung 70: Integration der Einbauspante bzgl. der Trockendichte in das Dreiecksnetzes der Phasenzusammensetzung nach Rudert [1977]	127

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anforderungen an die Systemkomponenten eines Oberflächenabdichtungssystems nach DepV [2002]	20
Tabelle 2:	Anforderungen an die Systemkomponenten eines Oberflächenabdichtungssystems gemäß neuer Deponieverordnung [DepV, 2009]	21
Tabelle 3:	Porengrößenklassen und Kennwerte der Wasserbindung [WITT & RAMKE, 2006]	26
Tabelle 4:	Ausgewählte Eigenschaften von Böden unterschiedlicher Korngrößenzusammensetzung [MARTIN & SAUERBORN, 2006]	33
Tabelle 5:	Auswahl geeigneter Böden für eine Wasserhaushaltsschicht [EGLOFFSTEIN et al., 2009]	33
Tabelle 6:	Eignung von Böden zum Einbau in Abhängigkeit vom Feuchtezustand (DIN 19731 [1998]) und der Konsistenz (DIN 19682-5 [2007]) bei bindigem Material [LFUG, 1999]	35
Tabelle 7:	Auswahl von Einbauverfahren für den unverdichteten Bodeneinbau [KONOLD et al., 2005]	36
Tabelle 8:	Vergleich der langjährigen meteorologischen Mittelwerte (Temperatur und Niederschlag) für die Standorte Bautzen/Kubschütz und Görlitz	40
Tabelle 9:	Mittlere jährliche Niederschlagsmengen von Bautzen und Görlitz im Vergleich [DWD, 2010]	42
Tabelle 10:	Auswahl der Eignungsuntersuchungen für die Böden der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz im Geotechnik-Labor der HTW Dresden	46
Tabelle 11:	Klassifizierung des Oberbodens in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	50
Tabelle 12:	Klassifizierung des bindigen Bodens in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	52
Tabelle 13:	Klassifizierung des gemischtkörnigen Bodens in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	54
Tabelle 14:	Untersuchungsergebnisse ausgewählten Böden der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	55
Tabelle 15:	Einbauparameter der Böden in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	57
Tabelle 16:	Protokoll des Bodeneinbaus am Beispiel Lysimeter 1 der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	57
Tabelle 17:	Messtechnische Bestückung der Lysimeter in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	60
Tabelle 18:	Zusammensetzung der aufgetragenen Vegetation auf dem Gelände der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	62
Tabelle 19:	Untersuchungsprogramm zu den Aufgrabungen an der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz	64
Tabelle 20:	Mittlere Sickerwassermengen [mm] in den fünf hydrologischen Halbjahren (Sommerhalbjahr SHJ; Winterhalbjahr WHJ) im Zeitraum 11/2007 - 04/2010	76
Tabelle 21:	Durchwurzelungstiefe in den Aufgrabungsfeldern der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz im Jahre 2010	81
Tabelle 22:	Vertikaler Schichtenaufbau der Lysimeter der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz als Input zur Modellierung	93
Tabelle 23:	Übersicht über die pedologischen Parameter der Böden der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz für die BOWAHALD-Modellierung	94
Tabelle 24:	Vergleichende Betrachtung der gemessenen und modellierten (BOWAHALD) Sickerwassermengen der Lysimeter der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz (11/2007 - 04/2010)	95
Tabelle 25:	Einstufung der Trockendichte nach DIN 4220 [2008]	102

Tabelle 26: Mittlerer effektiver Wurzelraum ($W_{zr_{eff}}$) und pflanzenverfügbare Bodenwassermenge (w_{pfl}) bei mittlerer Lagerungsdichte und in Abhängigkeit von der Bodenart für Getreide im Norddeutschen Tiefland [BLUME et al., 2011]	105
Tabelle 27: Verwendete Gras-/Kräutermischungen für die Ebene „Durchwurzelung“	106
Tabelle 28: Durchwurzelungstiefen und ausgewählte Zeigerwerte nach ELLENBERGER et al. [1992] der Pflanzen, die am häufigsten in den Saatgutmischungen vorkommen	108
Tabelle 29: Durchwurzelungstiefen und ausgewählte Zeigerwerte nach ELLENBERGER et al. [1992] für betrachtete Straucharten	111
Tabelle 30: Durchwurzelungstiefen und ausgewählte Zeigerwerte nach ELLENBERGER et al. [1992] für die betrachteten Nadelgehölze	113
Tabelle 31: Durchwurzelungstiefen und ausgewählte Zeigerwerte nach ELLENBERGER et al. [1992] für die betrachteten Laubgehölze	114
Tabelle 32: Teilsicherheitsbeiwerte für den Nachweis der Gleitsicherheit nach Gl. 10 [WITT, 2009]	118
Tabelle 33: Bodenartenspezifische Kennwerte für die Standsicherheitsberechnung aus dem Entwurf zur DIN 1055-2 [2007]	119
Tabelle 34: Ergebnisse der Standsicherheitsberechnungen für die Bemessungssituation BS-P mit dem Programm GGU-Stability (Version 9)	122

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

A	durchströmte Fläche
AbfAbIV	Abfallablagerungsverordnung
ACAP	Alternative Cover Assessment Project
AG Boden	Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
ALCD	Alternative Landfill Cover Demonstration
a'_d	Bemessungswert für die wirksame Adhäsion bei geosynthetischen Reibungspartnern
BB	bindiger Boden
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundesbodenschutzverordnung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BNatSchG	Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege - Bundesnaturschutzgesetz
BS-A	Eigengewicht der Abdichtung und der Überlagerung inkl. tolerierbarem Überprofil, Einstau der Drainage, standortspezifische Schneelast, Verkehrslasten und Zusatzlasten (z. B. Erdbeben)
BS-P	Eigengewicht der Abdichtung und der Überlagerung inkl. tolerierbarem Überprofil, Einstau der Drainage und Schneelast
BS-T	Eigengewicht der Abdichtung und der Überlagerung inkl. tolerierbarem Überprofil, Einstau der Drainage und Verkehrslasten aus dem Baustellenverkehr
CH ₄	Methan
C _U	Ungleichförmigkeitszahl
c	Kohäsion
c'	wirksame Kohäsion
c' _d	Bemessungswert der wirksamen Kohäsion in der Gleitfuge
c _p	spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck
DepV	Deponieverordnung
DGGT	Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V.
DK	Deponieklasse
D _{Pr}	Verdichtungsgrad
DWD	Deutscher Wetterdienst
DWT _{eff}	effektive Durchwurzelungstiefe
d	Dicke/Mächtigkeit/Schichtstärke
d ₁₀	Korngröße bei 10% Siebdurchgang
d _w	Mächtigkeit der durchströmten Schicht des Rekultivierungsbodens
E _B	Evaporation Boden
E _d	Einwirkungen
E _I	Evaporation Pflanze (Interzeption)
E _S	Evaporation Streu
ET	Evapotranspiration
ETR	tatsächliche Evapotranspiration
E2-31	GDA-Empfehlung Nr. 2-31
e	Porenzahl
e	aktueller Dampfdruck
e _s (T)	Sättigungsdampfdruck
F	Feuchtezahl
FDR	Frequency Domain Reflectometry
FK	Feldkapazität
FLL	Forschungsanstalt für Landesentwicklung und Landschaftsbau e. V.
G	Bodenwärmestrom
GB	gemischtkörniger Boden

GDA	Geotechnik der Deponien und Altlasten
GEO-3	Grenzzustände des Bodens, bei denen das Nachweisverfahren 3 angewendet wird
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
Gl.	Gleichung
geogr.	geografische
h	Druckhöhenunterschied
HDPE	Polyethylen hoher Dichte (High-Density-Polyethylen)
HJ	hydrologisches Jahr
HTW Dresden	Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden
I_p	Plastizitätszahl
i	Index der Schicht oder Lage
K	Kontinentalitätszahl
KA5	Bodenkundliche Kartieranleitung (5. Auflage)
KDB	Kunststoffdichtungsbahn
KG	Korngröße
KrW-/AbfG	Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz)
KWB	Klimatische Wasserbilanz
k_C	Bestandskoeffizient
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert (gesättigter Zustand)
L	spezielle Verdunstungswärme
L/B/H	Länge/Breite/Höhe
LK	Luftkapazität
l	Fließlänge / Fließstrecke
MEAB	Märkische Entsorgungsanlagen Betriebsgesellschaft mbH
m u. GOK	Meter unter Geländeoberkante
m ü. HN	Meter über Höhennormal
m ü. NN	Meter über Normalnull
N	Nord
n	Porenanteil
n_a	Porenluftanteil
n. Br.	nördliche Breite
nFK	nutzbare Feldkapazität
n_w	Porenwasseranteil
nWk	nutzbare Wasserkapazität
O	Ost
P	Niederschlag (Precipitation)
P	Kapillarspannung
PNV	potenzielle natürliche Vegetation
PWP	Permanenter Welkepunkt
pF	pF-Wert (negativer dekadischer Logarithmus der Wasserspannung)
pF-Kurve	Kapillarspannungs-Sättigungs-Kurve
p_k	schichtparallele Verkehrslast
Q	Durchfluss / Durchsickerung
Q_L	Durchsickerung aus den Lysimetern
Q_B	Durchsickerung als Ergebnis der BOWAHALD-Berechnung
R	Abfluss
RAVON	Regionaler Abfallverband Oberlausitz/Niederschlesien
R_d	Widerstände
R_l	lateralen Abfluss
R_n	Nettostrahlung
R_n^*	Verdunstungsäquivalent der Nettostrahlung
R_O	Oberflächenabfluss
R_S	Absickerung

RSM	Regelsaatgutmischung
r_a	aerodynamischer Widerstand
r_c	Bestandswiderstand
SHJ	hydrologisches Sommerhalbjahr
SMUL	Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft
S_R	Sättigungsgrad
S_r	Sättigungszahl
s	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve
s_k	Schneelast
T	Transpiration
T	Temperatur
TA	Technische Anleitung
TK	Topografische Karte
U	Ungleichförmigkeitszahl (nach DIN 18196)
U	relative Luftfeuchte
V	Volumen
V_{Ca}	Kalkgehalt
V_{gl}	Glühverlust
V_L	Volumenanteil der Luft
V_S	Volumenanteil der Festmasse
V_W	Volumenanteil des Wassers
WHJ	hydrologisches Winterhalbjahr
WMO	World Meteorological Organization
W_P	Durchwurzelungstiefe (nach AG Boden)
W_{Pfl}	pflanzenverfügbares Bodenwasser
WS	Wassersäule
$Wz_{r_{eff}}$	effektiver Wurzelraum
w	Wassergehalt
w_A	Wasseraufnahmevermögen
w_L	Fließgrenze
w_n	natürlicher Wassergehalt
w_P	Ausrollgrenze
w_{Pr}	Wassergehalt bei Proctordichte
w_S	Wassergehalt an der Schrumpfgrenze
wW_P	wirksame Durchwurzelungstiefe
ZÖF	Zittauer Ökologische Forschungsstation
β	Neigungswinkel
γ	Psychrometerkonstante
γ	Wichte des Bodens
γ^*	modifizierte Psychrometerkonstante
γ_c	Teilsicherheitsbeiwert für die Kohäsion
γ_G	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Beanspruchungen
γ_k	charakteristische Wichte des Bodens
γ_k^i	charakteristische Wichte der durchströmten Bodenschicht unter Auftrieb
$\gamma_{k,r}$	charakteristische Wichte der wassergesättigten Bodenschichten
γ_Q	Teilsicherheitsbeiwert für ungünstig veränderliche Einwirkungen
γ_ϕ	Teilsicherheitsbeiwert für den Reibungswert ϕ
ΔS	Wasservorratsänderung
μ	Ausnutzungsgrad
μ_A	Albedo
μ_{max}	maximaler Ausnutzungsgrad
ρ_d	Trockendichte
ρ_L	Luftdichte
ρ_{Pr}	Proctordichte

ρ_s	Korndichte
σ_d	Bemessungswert des wirksamen Reibungswinkels in der Gleitfuge bei geosynthetischen Reibungspartnern
σ_k	charakteristischer Wert des wirksamen Reibungswinkels in der Gleitfuge bei geosynthetischen Reibungspartnern
φ	Reibungswinkel
φ'	wirksamer Reibungswinkel
φ_d	Bemessungswert des wirksamen Reibungswinkels in der Gleitfuge
φ_k	charakteristischer Wert des wirksamen Reibungswinkels in der Gleitfuge
Ψ_m	Matrixpotenzial

Die Abkürzungen für die Bodenarten entsprechen den Ausführungen in den zitierten Literaturangaben sowie den gültigen DIN.

1 Einleitung und Zielstellung

Entsprechend den abfallrechtlichen Vorgaben der Europäischen Gemeinschaft sowie der Bundesrepublik Deutschland ist die geordnete Beseitigung von Abfällen auf Deponien integraler Bestandteil der Abfallbeseitigungsstrategien [KrW-/AbfG, 1994]. Auch in der Zukunft werden Deponien erforderlich sein, da es der Kreislaufwirtschaft nicht in allen Fällen gelingt, Reststoffe aus der Abfallaufbereitung und -verbrennung, die keiner Verwertung mehr zugeführt werden können, umweltgerecht abzulagern. Erhöhte qualitative Anforderungen an die zur Beseitigung zugelassenen Abfälle sollen zu einer Minimierung der zu beseitigenden Abfallmengen führen [XIE, 2003]. Gleichwohl zeigt die Erfahrung, dass zur ordnungsgemäßen Abfallbeseitigung auch zukünftig Deponien notwendig sein werden, die nach ihrer Verfüllung gesichert werden müssen. Der Schutz der Pedosphäre und Hydrosphäre vor schädlichen Einwirkungen und Einflüssen durch das abgelagerte Deponiegut ist ein wesentliches Ziel. Dies wird durch qualifizierte Abdichtungssysteme (Basis- und Oberflächendichtsysteme) erreicht [TRESSELT et al., 1998]. Die Gesetzesgrundlage für die Planung, den Bau und den Betrieb einer Deponie ist in der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts – DepV [2009] festgeschrieben.

Im Jahre 2009 wurden sämtliche bis dato gültige Gesetzmäßigkeiten (Abbildung 1) in einem einheitlichen Regelwerk (DepV [2009]) zusammengefasst.

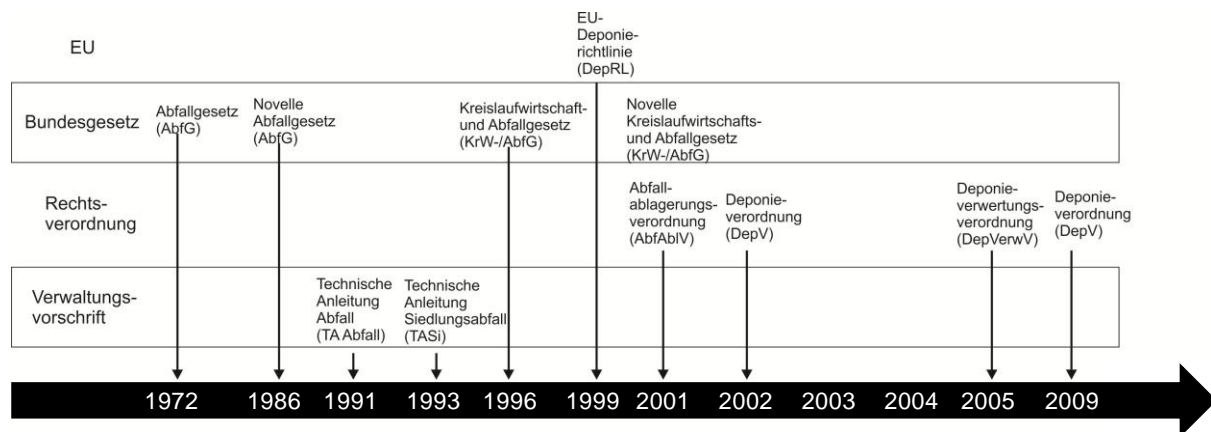


Abbildung 1: Zeitliche Entwicklung des Abfallrechts auf verschiedenen Rechtsebenen [PFEIFFER, 2006, verändert]

Im Rahmen des Gesamtsystems "Oberflächenabdichtung" gewann der Rekultivierungsboden zunehmend an Bedeutung. Dabei spielen Sachverhalte wie Mächtigkeit, Bodenart, Bewuchs, Einbaubedingungen, nutzbare Feldkapazität (nFK), Luftkapazität (LK) sowie Einbautechnik und Einbaudichte eine entscheidende Rolle für die Funktionalität [EGLOFFSTEIN et al., 2004; BIEBERSTEIN et al., 2003; OLSCHESKI et al., 2001; WIMMER et al., 2006; WITT & RAMKE, 2006; MARKWARDT, 2009; MELCHIOR, 2010].

Die DepV [2009] sieht erstmals Anforderungen an die Mächtigkeit und das Wasserspeichervermögen für Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten vor. Insbesondere geeignet dimensionierte Wasserhaushaltsschichten können für die Deponieklassen I und II (DK I und II) eine Dichtungskomponente des Oberflächenabdichtungssystems ersetzen. Um den Ansprüchen einer verdunstungsintensiven Vegetation gerecht zu werden, sind ausreichende Schichtmächtigkeiten und Böden mit einer entsprechenden nFK und LK erforderlich. Die Qualität des Bodenmaterials und der Umgang mit dem Material (bei der Entnahme, dem Transport und besonders beim Einbau) spielen eine große Rolle [EGLOFFSTEIN et al., 2009a].

Inwieweit der Bau und die Wirkungsweise einer Wasserhaushaltsschicht bereits den gegenwärtigen Stand der Technik widerspiegeln, wird derzeit noch diskutiert. Problematisch ist, dass die generellen Anforderungen an den Bau einer Wasserhaushaltsschicht nicht mit den Anforderungen an den konventionellen Erdbau bzw. mineralischen Dichtungsbau gleichzusetzen sind [EGLOFFSTEIN et al., 2004]. In der Vergangenheit erfolgte der Einbau von Rekultivierungsböden verdichtet (technologisch bedingt). Dies stellt einen Widerspruch zu den Anforderungen an eine Rekultivierungsschicht aus bodenkundlicher und pflanzenphysiologischer Sicht dar [BIEBERSTEIN et al., 2003; HAUBRICH, 2002; AL-AKEL et al., 2007]. Die große Bedeutung der interdisziplinären Herangehensweise bei der Planung und Ausführung von Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschichten spiegelt sich vor allem bei der Festlegung des Bewuchses (Gras-/Kräuterbewuchs; Sträucher, Bäume) und der darauf abzustimmenden Materialauswahl, Dimensionierung und dem Aufbau der Schicht wieder [SCHABER-SCHOOR, 2005].

Immer größere Bedeutung bei der Planung von Wasserhaushaltsschichten gewinnen auch die klimatischen Veränderungen. Die globalen und regionalen klimatischen Entwicklungen (Klimawandel) bedingen spezifische Anforderungen an die Qualität des verwendeten Bodenmaterials sowie des aufgetragenen Bewuchses [SMUL, 2008]. Die Folgen und Auswirkungen der prognostizierten Klimaänderungen sind deshalb bei der Bemessung von Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten ebenfalls zu berücksichtigen [HEILMEIER & SCHROIFF, 2009].

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einfacher interdisziplinärer Hilfsmittel für die Optimierung der Bodenauswahl und Bemessung/Dimensionierung von Wasserhaushaltsschichten. Dadurch lassen sich unnötige Fehler im Rahmen der Bodenauswahl, der Dimensionierung sowie der Festlegung von Einbaukennwerten und qualitätsbestimmenden Parametern minimieren [WATTENDORF, 2009]. Die Interdisziplinarität umfasst im Speziellen die Fachgebiete der Bodenkunde, Bodenmechanik / Geotechnik und Pflanzenkunde / Vegetationstechnik. Dabei sind insbesondere die Interaktionen zwischen Pflanzen und Boden Schwerpunkte der Betrachtungen.

2 Oberflächenabdichtung von Deponien und Altablagerungen

Im Gegensatz zur Definition nach dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes [KrW-/AbfG, 2005] gehören zum Begriff Deponie nach DepV [2002] neben oberirdischen auch unterirdische Deponien [SONDERMANN & HEJMA, 2004]. Gemäß der Definition nach DepV [2002] bzw. DepV [2009] unterscheidet man Deponien hinsichtlich Ablagerungsart, Ablagerungsbedingungen und Deponiegut in verschiedene Deponieklassen (DK 0 - DK IV). Die nachfolgenden Ausführungen befassen sich ausschließlich mit den Übertagedeponien der DK 0 – III.

2.1 Rechtliche Grundlagen

Mit der DepV [2002] wurden die konkreten Anforderungen für den weiterführenden Betrieb nach dem 01.06.2005 geregelt. Die DepV [2002] stellte eine Verordnung u. a. zum Bau, Betrieb und Abschluss von Deponien dar. Sie erhielt neben den damals gültigen Gesetzen, Verordnungen und technischen Anleitungen z. B. der Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV), der TA-Abfall und TA-Siedlungsabfall entsprechende Gültigkeit. Der Regelaufbau (Tabelle 1) nach DepV [2002] einer Oberflächenabdichtung bestand aus nachfolgenden Elementen und wird über entsprechende Fußnoten detailliert erläutert:

- Bewuchs
- Rekultivierungsschicht
- Entwässerungsschicht
- Abdichtschicht bzw. Dichtschichtsystem / -kombination
- Ausgleichsschicht ggf. Gasdrainschicht.

Tabelle 1: Anforderungen an die Systemkomponenten eines Oberflächenabdichtungssystems nach DepV [2002]

Systemkomponenten	DK 0	DK I	DK II	DK III
Ausgleichsschicht	nicht erforderlich	$d \geq 0,5 \text{ m}$	$d \geq 0,5 \text{ m}$	$d \geq 0,5 \text{ m}$
Gasdrainschicht	nicht erforderlich	nicht erforderlich	nicht erforderlich	nicht erforderlich
mineralische Dichtschicht	nicht erforderlich	$d \geq 0,5 \text{ m}$ $k_f \leq 5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$	$d \geq 0,5 \text{ m}$ $k_f \leq 5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$	$d \geq 0,5 \text{ m}$ $k_f \leq 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$
KDB	nicht erforderlich	nicht erforderlich	$d \geq 2,5 \text{ mm}$	$d \geq 2,5 \text{ mm}$
Schuttlage	nicht erforderlich	nicht erforderlich	erforderlich	erforderlich
Entwässerungsschicht	nicht erforderlich	$d \geq 0,3 \text{ m}$ erforderlich	$d \geq 0,3 \text{ m}$ $k_f \geq 5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$	$d \geq 0,3 \text{ m}$ $k_f \geq 5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$
Rekultivierungsschicht	$d \geq 1,0 \text{ m}$	$d \geq 1,0 \text{ m}$	$d \geq 1,0 \text{ m}$	$d \geq 1,0 \text{ m}$
Bewuchs	erforderlich	erforderlich	erforderlich	erforderlich

Mit der „Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts - DepV [2009]“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) werden alle Verordnungen zu einer neuen Verordnung zusammengefasst. Die Regeln zum Bau und Betrieb von Deponien werden durch die DepV [2009] nicht grundlegend geändert, sondern zusammengeführt und auf das Wesentliche konzentriert.

Der Gesetzgeber hält es vielmehr für geboten, die Regelungstiefe auf den Prüfstand zu stellen und Anforderungen zu entflechten. Es sollen dort Freiräume geschaffen werden, wo es geboten und vertretbar ist. Dabei ist der erreichte Stand der Technik nicht nur zu verfestigen, sondern seiner Entwicklung sind neue Impulse zu geben [DEUTSCHER BUNDESTAG, 2009].

Auf der Basis der Erfahrungen und Erkenntnisse aus Wissenschaft, Forschung und Praxis der letzten Jahrzehnte wird in der neuen DepV [2009] ein Regelsystem ohne Vorgaben bzgl. des Materials ausgewiesen. Vielmehr werden die erforderlichen Komponenten mit entsprechenden Leistungsvorgaben festgelegt [ENGELMANN, 2010]. Positiv erweist sich, dass Funktion und Wirkungsweise einer Rekultivierungs-, Wasserhaushalts- und technischen Funktionsschicht in das Gesamtsystem mit einbezogen werden können [SÄNGER, 2010].

Der Grundaufbau einer Oberflächenabdichtung richtet sich nach der Deponieklasseneinstufung. Deponien der Deponieklasse (DK) II und III benötigen zwei Dichtungskomponenten, die auf schädigende Einwirkungen redundant wirken [DepV, 2009]. Eine DK 0 Deponie kann ohne Abdichtungskomponente gesichert werden, wobei eine Rekultivierungsschicht bzw. eine technische Funktionsschicht erforderlich ist. Bei DK I Deponien ist die Implementierung mindestens einer Abdichtungskomponente Pflicht (Tabelle 2).

Tabelle 2: Anforderungen an die Systemkomponenten eines Oberflächenabdichtungssystems gemäß neuer Deponieverordnung [DepV, 2009]

Systemkomponenten	DK 0	DK I	DK II	DK III
Ausgleichsschicht	nicht erforderlich	erforderlich	erforderlich	erforderlich
Gasdrainschicht	nicht erforderlich	nicht erforderlich	ggf. erforderlich	ggf. erforderlich
1. Abdichtungskomponente	nicht erforderlich	erforderlich	erforderlich	erforderlich
2. Abdichtungskomponente	nicht erforderlich	nicht erforderlich	erforderlich	erforderlich
Entwässerungsschicht $d \geq 0,3 \text{ m}$ Gefälle 5%; $k_f \geq 10^{-3} \text{ m/s}$	nicht erforderlich	erforderlich	erforderlich	erforderlich
Rekultivierungsschicht	erforderlich	erforderlich	erforderlich	erforderlich

Die einzelnen Systemkomponenten werden in der DepV [2009] über Fußnoten näher beschrieben. Sie können demnach in Absprache mit der zuständigen Fachbehörde ggf. abgemindert werden.

Sofern eine Abdichtungskomponente auf Deponien der Klasse II als Konvektionssperre fungiert (z. B. Kunststoffdichtungsbahn (KDB), Asphalt), kann auf die zweite Abdichtungskomponente verzichtet werden. Voraussetzung dafür ist ein Dichtungskontrollsystem oder eine Rekultivierungsschicht, die als Wasserhaushaltsschicht qualifiziert wird [ENGELMANN, 2010].

Durch die DepV [2009] wird der Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht eine größere Bedeutung im Sinne einer „Ewigkeitskomponente“ beigemessen. Dabei werden die Parameter nFK, Mindestschichtstärke und maximale Durchsickerung durch die Verordnung vorgegeben.

Wird Bodenmaterial als Rekultivierungsschicht eingesetzt, so hat sich die Schichtmächtigkeit am Schutzerfordernis (z. B. Austrocknung, Durchwurzelung, Frosteinwirkung) der Abdichtung zu orientieren. Sie hat aber mindestens 1 m zu betragen [DepV, 2009].

Stellt der Boden eine durchwurzelungsfähige Schicht dar, so sind die Anforderungen nach §12 BBodSchV einzuhalten [BBodSchG, 1999]. Die Bodenmaterialien müssen im Weiteren die chemischen Kriterien des Anhangs 3, Nummer 2 der DepV [2009] erfüllen. Das Drainagewasser muss den wasserrechtlichen Vorschriften zur Einleitung entsprechen. Des Weiteren ist eine nFK von größer 140 mm (bezogen auf die Gesamtdicke) notwendig [DEPV, 2009].

Fungiert die Rekultivierungsschicht als Wasserhaushaltsschicht, so sind eine Mindestdicke von 1,5 m und eine nFK (bezogen auf die Gesamtdicke) von mehr als 220 mm erforderlich. Darüber hinaus empfiehlt MELCHIOR [2010a] eine LK von ≥ 8 Vol.-% zu gewährleisten.

Die quantitative Sickerwassermenge darf bei DK II-Deponien max. 10% vom langjährigen Mittel des Niederschlags, aber nicht mehr als 60 mm/a (spätestens 5 Jahre nach Herstellung) bzw. bei DK I-Deponien nicht mehr als 20 mm/a (im 5-jährigen Mittel), betragen [STOCK, 2010].

Fehlt im Gesamtsystem eine Konvektionssperre (bei DK I, II und III), so ist die Funktionalität des Systems mit einem Kontrollfeld (mind. 300 m²) bis zum Ende der Nachsorgephase nachzuweisen [DEPV, 2009]. Dies trifft sowohl auf Deponien zu, die nur mit einer Wasserhaushaltsschicht als alleinigem Abdichtungselement, als auch solche, die mit einer Kombination aus Wasserhaushaltsschicht und einer mineralischen Abdichtungskomponente gesichert werden.

2.2 Der Wasserhaushalt von Oberflächenabdichtungssystemen - Stand von Wissenschaft und Technik

Seit mehr als 15 Jahren wird in mehreren Fachdisziplinen über eine langzeitsichere Oberflächenabdichtung für DK 0 – III diskutiert. Die Systemkomponente „Rekultivierungsschicht + Bewuchs“ soll dabei in Form einer optimierten Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht auftretende Sickerwasserzuflüsse reduzieren und vergleichmäßigen [WATTENDORF & SOKOLLEK, 2003; EGLOFFSTEIN & BURKHARDT, 2002; MADALINSKI et al., 2003].

Bisherige Untersuchungen konzentrierten sich schwerpunktmäßig auf die mineralischen Dichtungselemente [MELCHIOR, 1993; HAUBRICH & WATTENDORF, 2002; WAGNER & SCHNATMEYER, 2002; SIMON & MÜLLER, 2004; SOKOLLEK et al., 2006].

Die Wirksamkeitsbetrachtungen an Oberflächenabdichtungssystemen rückten erst seit Beginn des 21. Jahrhunderts in den Mittelpunkt. Der Schichtaufbau und die Standortfaktoren beeinflussen den Wasserhaushalt von Oberflächenabdichtungssystemen.

Die ökologischen Randbedingungen (z. B. Vegetation, Klima, Boden) bestimmen die Infiltrationsrate, die sich längerfristig (> 50 a) unter einem Abdichtungssystem einstellt [ZORNBERG et al., 2003; BAUMERT et al., 2006; SCHNEIDER, 2005; REUTER, 2007].

Lysimeteruntersuchungen an unterschiedlichen Abdeckschichten in den USA zeigten, dass mittels Evapotranspiration bis zu 86% des Niederschlags wieder in die Atmosphäre abgegeben werden [CAMPBELL et al., 1991; WARREN et al., 1996; SCANLON et al., 2005; NYHAN, 2005; NYHAN et al., 2009].

Dies deckt sich mit europäischen Untersuchungsergebnissen [HEERTEN & KOERNER, 2008; MAIER-HARTH, 2009; MÜLLER et al., 2009; MÜLLER et al., 2010]. Untersuchungen von WOLSFELD [2005] an Lysimetern auf einer Deponie der Dillinger Hütte im Saarland beschreiben einen Wasserverbrauch durch Evapotranspiration von ca. 85% des Niederschlags durch eine 1 m mächtige bzw. ca. 95% aus einer 2 m mächtigen Wasserhaushaltsschicht.

SCHNEIDER [2005] beschreibt die Abhängigkeiten zwischen dem standortspezifischen Ökosystem und dem Wasserhaushalt eines Oberflächenabdichtungssystems. Die Vegetation hat durch das spezifische Transpirationspotenzial und ihr artspezifisches Wurzelregime einen bedeutenden Einfluss auf den Wasserhaushalt.

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschichten wird die Wasserbilanzgleichung (Gleichung (Gl.) 1) genutzt [SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002]:

$$P = ET + R + \Delta S \quad (1)$$

P ... Niederschlag; ET ... Evapotranspiration; R ... Abfluss; ΔS ... Wasservorratsänderung

Abbildung 2 stellt graphisch die primären Komponenten eines Oberflächenabdichtungssystems dar.

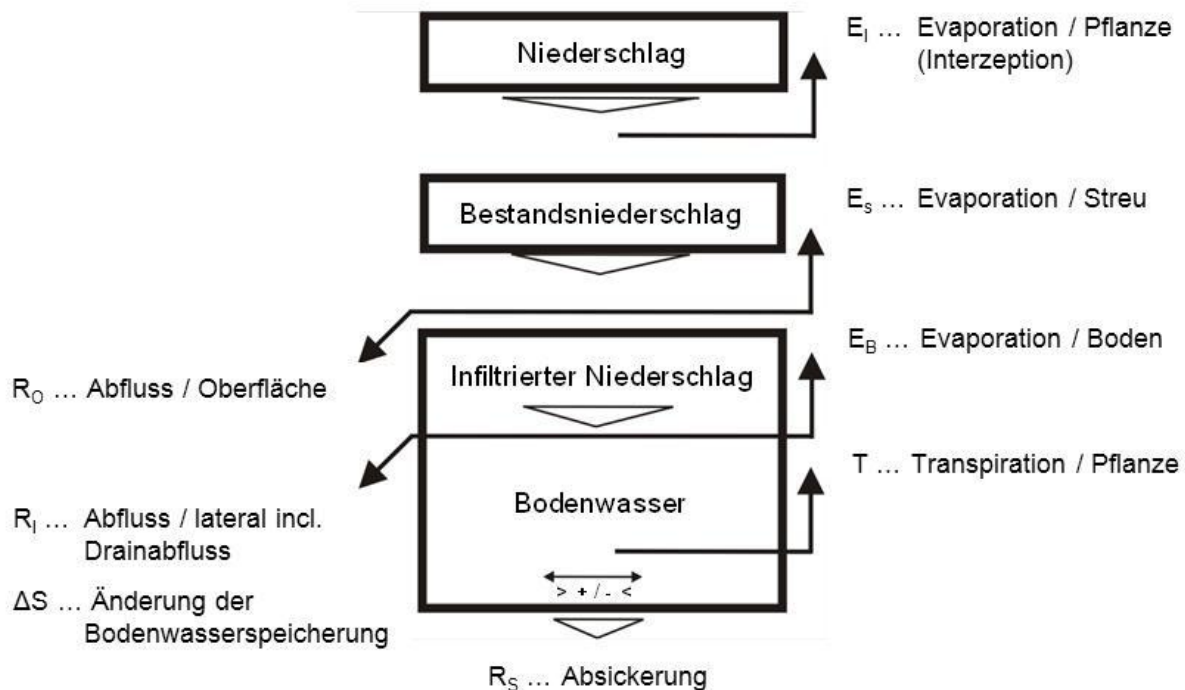


Abbildung 2: Wasserhaushaltskomponenten eines Oberflächenabdichtungssystems [HAUBRICH & WATTENDORF, 2002, verändert]

Voraussetzung für die Aufstellung einer Wasserbilanz ist die Erfassung der hydrologischen Variablen (Abbildung 2). Für lange Zeiträume ist die Speicheränderung zu vernachlässigen [SCHNEIDER, 2005; SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002].

2.2.1 Der Wasserhaushalt einer Wasserhaushaltsschicht

Über das Zusammenwirken der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und Speicheränderung definiert sich der Wasserhaushalt eines Abdeck- bzw. Abdichtungssystems [BAUMGARTNER & LIEBSCHER, 1996; DYCK & PESCHKE, 1995, BENGTSOON et al., 1993]. Wasserwirtschaftliche Versuche an Uranerzbergbauhalden haben verdeutlicht, dass die Variabilität des Wasserhaushalts eines Abdecksystems durch folgende 3 Komponenten bestimmt wird [MEGGYES et al., 1998; SCHNEIDER, 2005]:

- das standortbezogene Klima,
- die Vegetation und
- die bodenkundlich-bodenphysikalischen Eigenschaften.

Wie weit die Versickerung innerhalb der Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht vertikal vordringt, ist von vielen Faktoren abhängig. Die auffüllbare Porosität (Gesamt-volumen abzüglich des Anteils wassergefüllter Porenräume) und die Bodenschichtung spielen dabei in einer Rekultivierungsschicht eine entscheidende Rolle [GARDNER & WIDSTOE, 1921; IBRAGINOV et al., 2001; DUNGER, 2009]. Ein Teil des Infiltrationswassers wird

im Boden durch Kapillarkräfte und Dipolbindungen an der Bodenmatrix gebunden [PHILIP, 1957]. Das Matrixpotenzial (Ψ_m) beschreibt die Energie, mit der das Wasser adhäsiv an der Bodenmatrix gehalten wird. Um das Wasser von der Bodenmatrix zu lösen, ist ein Energieaufwand notwendig. Demnach ist das Matrixpotenzial des gebundenen Wassers negativ und wird als Saugspannung ($-\Psi_m$) bezeichnet.

Je nach Bodenart können die Saugspannungen mehrere Potenzen voneinander abweichen. Daher wird der dekadische Logarithmus zur Beschreibung der Saugspannung (pF-Wert) verwendet [HÖLTING & COLDEWEY, 2005]. Je mehr die Poren mit Wasser gefüllt sind, desto geringer wird der pF-Wert bzw. die Saugspannung.

Die vertikalen Wasserbewegungen im Boden erfolgen unter dem Einfluss der Gravitationskraft. Der Grad der Wassersättigung bei der Infiltration bedingt, ob und inwieweit Grobporen, Wurzel- und Wurmgänge mit Wasser gefüllt werden.

Zur Beurteilung des Bodenwasserhaushaltes werden die charakteristischen Zustandsgrößen Feldkapazität (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und permanenter Welkepunkt (PWP) herangezogen (Abbildung 3).

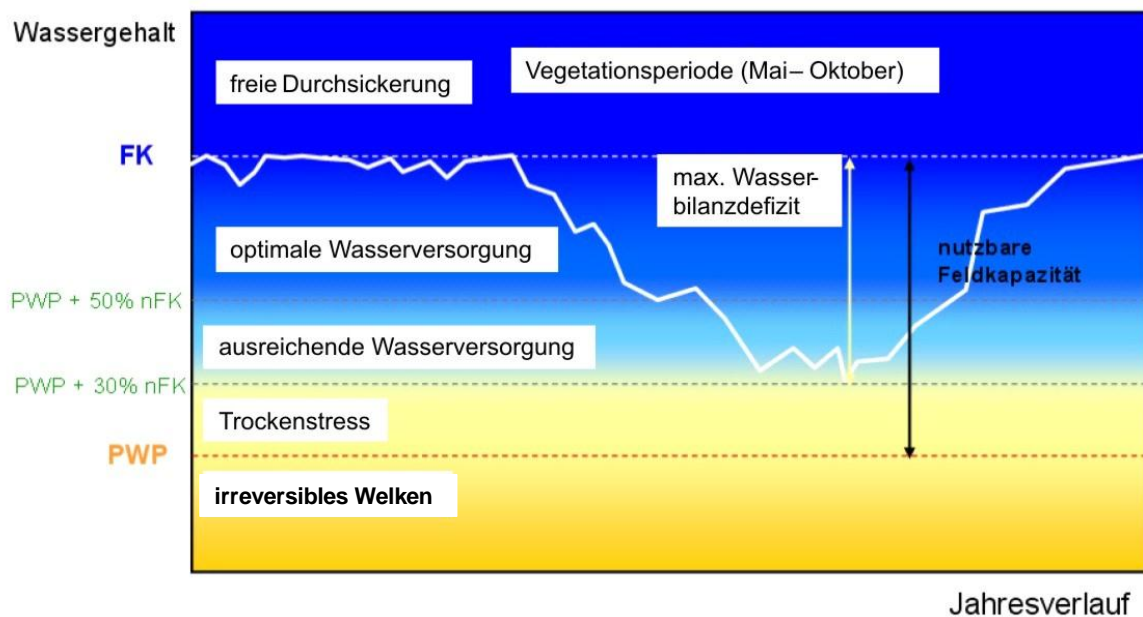


Abbildung 3: Bodenwasservorrat im Jahresverlauf [LANUV NRW, 2010, verändert]

Diese Werte entsprechen Wassergehalten, die charakteristisch für die zu beurteilenden Bodenschichten bzw. -horizonte sind (Abbildung 4) [SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002].

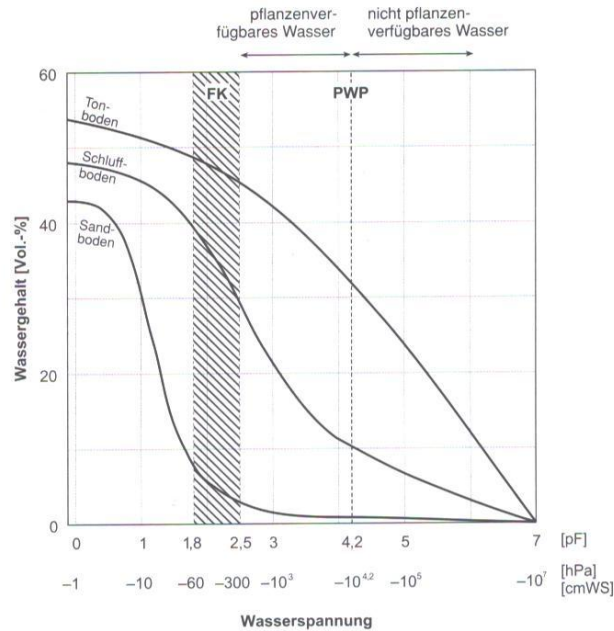


Abbildung 4: Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehung bei Sand, Schluff und Ton [SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002]

Das Porenvolumen eines Bodens bestimmt das Wasserspeichervermögen der Rekultivierungsschicht. Die Differenz der Tensionen (Spannungen) bei pF 1,8 und 4,2 wird als nutzbare Feldkapazität und von anderen Autoren auch als nutzbare Wasserkapazität (nWk) bezeichnet (Abbildung 4; Tabelle 3) [POTT & HÜPPE, 2007].

Tabelle 3: Porengrößenklassen und Kennwerte der Wasserbindung [WITT & RAMKE, 2006]

Tabelle 6.1: Porengrößenklassen und Normwerte der Wassersäugung [1, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100]					
Porenbezeichnung	Äquivalent-Durchmesser der Poren	Saugspannungsbereich		Speicherkapazität	Bodenwasser
	[µm]	[cm WS*]	pF-Wert		
weite Grobporen	> 50	< 60	< 1,8	Luftkapazität	Sickerwasser
Feldkapazität (FK)					
enge Grobporen	50 - 10	60 - 300	1,8 - 2,5	nutzbare Feldkapazität (nFK)	
Mittelporen	10 - 0,2	300 - 15000	2,5 - 4,2		
Permanenter Welkepunkt (PWP)					Haftwasser
Feinporen	< 0,2	> 15000	> 4,2	Totwasser	

* 1 cm Wassersäule (WS) entspricht 1 hPa

Die nFK ist primär abhängig vom Grob- und Mittelporenanteil des Bodens. Organische Substanzen mit hohem Mittelporenanteil erhöhen die nFK eines Bodens. Der Eintrag von Verdichtungsenergie hingegen bedingt eine Erniedrigung der FK [HOEPFNER, 2006].

2.2.2 Anforderungen und Ziele an eine Wasserhaushaltsschicht

Entsprechend der Definition nach MELCHIOR und CLAUSSEN [2004] ist unter einer Wasserhaushaltsschicht eine Rekultivierungsschicht zu verstehen, die so gestaltet und hergestellt ist, dass sie an Standorten mit geringem Niederschlagseintrag und hoher

potenzieller Verdunstung ein Ersatz für Komponenten einer Kombinationsabdichtung sowie die mineralische Dichtung (DK I) darstellen kann. Dabei muss so viel Wasser pflanzenverfügbar im Boden gespeichert werden können, dass eine Absickerung des Wassers aus dem Wurzelraum stark reduziert werden kann [MELCHIOR & CLAUSSEN, 2004]. Die Rekultivierungsschicht ist unter dem Aspekt der Langzeitfunktionalität das wichtigste Element eines Oberflächenabdichtungssystems. Dies resultiert aus der Erkenntnis, dass im Laufe der Jahrzehnte und Jahrhunderte jedes Dichtelement teilweise versagt [BOTHMANN, 2005].

Langjährige Untersuchungen in Deutschland und den USA verdeutlichen, dass die langfristige Wirksamkeit und die Langzeitbeständigkeit einer einfachen mineralischen Dichtung mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Zwei größere Untersuchungsprogramme (Alternative Cover Assessment Project [ACAP]; Alternative Landfill Cover Demonstration [ALCD]) in den USA zeigten, dass an humiden Standorten konventionelle Oberflächenabdichtungen mit einer mineralischen Dichtschicht ähnlich hohe Sickerwasserraten wie Wasserhaushaltsschichten aufweisen [ALBRIGHT et al., 2004; BENSON et al. 2004; ROESLER et al., 2002].

Die Rekultivierung von Deponien ist erst seit wenigen Jahrzehnten Gegenstand eingehender Untersuchungen. Dabei stand in der Vergangenheit die Deponierekultivierung schwerpunktmäßig unter dem Blickwinkel der „Begrünung“. Erst seit wenigen Jahren wurde der Bedeutung der Wasserhaushaltsfunktion eines Rekultivierungsbodens vermehrt Beachtung geschenkt [KONOLD et al., 2005].

Einer Rekultivierungsschicht können nachfolgende Aufgaben zugeordnet werden [MELCHIOR & CLAUSSEN, 2004]:

- Abschirmung des Deponieguts von der Umwelt, insbesondere von Mensch, Tier, Pflanze, Luft und Boden
- Pflanzenstandort
- Schutz tiefer liegender Schichten des Oberflächenabdichtungssystems
- Wasserhaushaltsoptimierung des Gesamtsystems

Um diese Funktionen optimal erfüllen zu können, sind folgende Anforderungen an das Rekultivierungsmaterial zu stellen [EGLOFFSTEIN et al., 2004]:

- gutes Infiltrationsvermögen
- gute Durchwurzelung
- hohe nFK und LK
- ausreichend pflanzenverfügbare Nährstoffe
- günstiges bodenchemisches Milieu (Bodenreaktion, Pufferung)
- ausreichende Mächtigkeit der Gesamtschicht
- umweltverträgliches Bodenmaterial

- hohe Erosionsbeständigkeit
- stabiles Korngerüst und gleichmäßiges Bodengefüge
- ausreichende Standsicherheit
- Vermeidung von Stauhorizonten

Gegenwärtig wird ein 2-lagiger Aufbau (Oberboden bzw. Versickerungshorizont und Wasserspeicherhorizont) für Rekultivierungsschichten favorisiert. Dabei ist die Oberbodenschicht maximal 0,3 m mächtig und besteht aus humushaltigem Boden. Mit einer Mächtigkeit von ca. 0,7 bis 2,7 m erfolgt der Aufbau der Unterbodenschicht. Hierfür wird mineralischer Boden mit einem geringen Anteil organischer Substanz verwendet [EGLOFFSTEIN & BURKHARDT, 2004]. Die Abbildung 5 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Oberflächenabdichtungssystems aus Kunststoffdichtungsbahn und Wasserhaushaltsschicht.

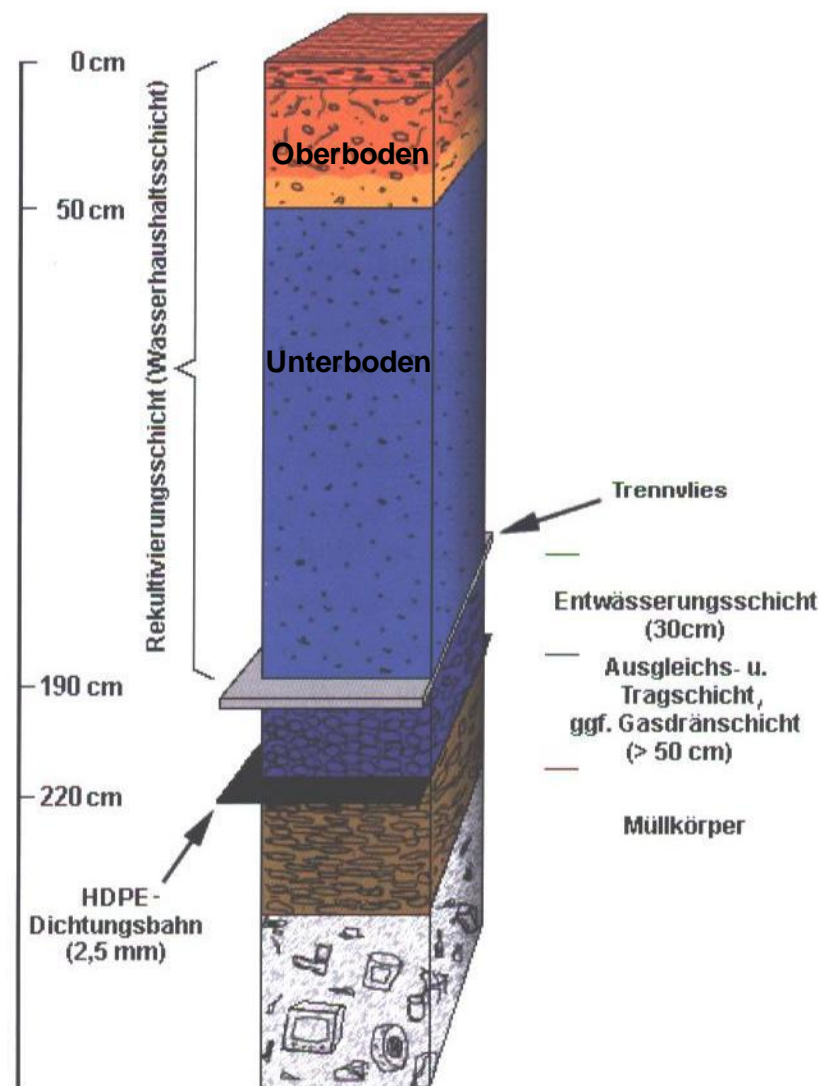


Abbildung 5: Beispiel für ein Oberflächenabdichtungssystem aus Kunststoffdichtungsbahn und Wasserhaushaltsschicht [MAIER-HARTH et al., 2005; verändert]

Wird die Rekultivierungsschicht als Wasserhaushaltsschicht konzipiert, sind weitere spezifische konzeptionelle, quantitative und qualitative Anforderungen an das Material und den Einbau zu stellen [EGLOFFSTEIN et al., 2004; EGLOFFSTEIN & BURKHARDT, 2004].

Dieses System einer alternativen Oberflächenabdichtung basiert darauf, dass z. B. die Wasserhaushaltsschicht die Funktion einer mineralischen Dichtschicht, d. h. einer klassischen Oberflächenabdichtung für Deponieklasse II (DK II) im Hinblick auf die Sickerwasserreduktion ersetzt [EGLOFFSTEIN & BURKHARDT, 2004]. Die Mächtigkeit einer Wasserhaushaltsschicht hängt dabei hauptsächlich vom erforderlichen Wasserspeichervermögen des Bodens ab und ist sehr eng mit den bodenphysikalischen Eigenschaften des Bodens, dem geplanten Bewuchs sowie den klimatischen Randbedingungen verbunden [MAIER-HARTH et al., 2005].

Bei der Auswahl der Böden ist darauf zu achten, dass das Porenvolumen und die Porenverteilung so zu bemessen sind, dass das Niederschlagsangebot gespeichert und im Jahresverlauf (vor allem in der Vegetationsperiode) zur Verfügung gestellt werden kann. Die Feinporen mit einem Durchmesser von weniger als 0,2 µm speichern zwar das Wasser sehr lange, jedoch ist dieses Wasser nicht mehr für die Pflanzen nutzbar. Das pflanzenverfügbare Wasser ist in den Mittelporen (Porendurchmesser 0,2 - 10 µm) vorzufinden. Für die optimale Durchlüftung und damit Sauerstoffversorgung des Bodens sind die Grobporen (Porendurchmesser 10 - 50 µm) notwendig [POTT & HÜPPE, 2007].

Des Weiteren ist auf das Verhältnis von Feststoffvolumenanteil zu Porenvolumen (gas- und wassergefüllter Porenvolumenanteil) zu achten. Es müssen Hohlräume vorliegen, die so groß sind, dass die Böden selbst bei einer Wasserversorgung bis in den Bereich der Feldkapazität noch ausreichend Hohlraum für die Luftversorgung haben. Wenn das Luftvolumen ca. 8 - 10% des Gesamtbodenvolumens im wassergesättigten Zustand einnimmt, so ist eine ausreichende Sauerstoffzufuhr für die Wurzelatmung und das Leben der aeroben Mikroorganismen gegeben.

Art und Häufigkeit der Porengrößen hängen von der Korngrößenverteilung und der Bodenstruktur (z. B. Einzelkorn- oder Krümelstruktur) ab. In einem sehr bindigen Boden (z. B. Tonboden) dominieren aufgrund des hohen Feinkornanteils Feinporen.

Des Weiteren weisen die Tonkolloide aufgrund von Hydratation eine gewisse Quellkapazität auf. Dies geht mit einer deutlichen Reduzierung der Luftkapazität im Boden einher und kann unabhängig vom Grundwasserstand zu Staunässe führen [POTT & HÜPPE, 2007].

2.2.3 Dimensionierung einer Wasserhaushaltsschicht

Die Mächtigkeit einer Wasserhaushaltsschicht ist standortspezifisch zu betrachten, da sie von der benötigten Wasserspeicherkapazität abhängig ist. Dabei ist neben der

Niederschlagsquantität und der innerjährlichen Verteilung auch die Durchwurzelungstiefe des Bewuchses zu berücksichtigen [WIMMER et al., 2006].

Bei der Nutzung standortspezifisch optimierter Böden reichen in Regionen mit Jahresniederschlägen ≤ 650 mm i. d. R. Mächtigkeiten von 1,5 - 2,0 m aus. Dabei hat die Mächtigkeit des Oberbodens zwischen 0,3 und 0,5 m zu betragen. Die Unterbodenschicht ist mit 1,2 - 1,5 m zu dimensionieren. Größere Mächtigkeiten der Ober- und Unterböden bewirken keine Vorteile, da der Großteil der einheimischen Pflanzen (außer Strauch- und Baumbestände) das Bodenwasser aus einer Tiefe von mehr als 2 m nicht mehr erschließen kann [MAIER-HARTH et al., 2005].

NEUMANN [1999] nimmt als Basis für die Konzipierung der Mindeststärke einer Rekultivierungsschicht die entsprechenden Wachstumsbedingungen der Pflanzen. Dabei weist er für Gras- und Kräutersaaten eine Mindeststärke der Rekultivierungsschicht von 0,3 m, für Strauchpflanzen von 0,5 m und für Bäume (Wuchshöhen > 15 m) von 1,5 m aus. Bei einer ungestörten Vegetationsentwicklung ist davon auszugehen, dass sich nach ca. 50 - 60 Jahren ein „Waldstadium“ entwickelt hat [GDA, 2000].

Da der Austrocknungsschutz einer mineralischen Dichtung vorrangig von der Wechselwirkung Rekultivierungsschicht / mineralische Dichtung gewährleistet wird [BEHRENS, 2006], muss die Rekultivierungsschicht einen hierfür gerade ausreichenden Bodenwasservorrat zur Verfügung stellen. Untersuchungen von KONOLD et al. [1997] verdeutlichen, dass unabhängig vom Substrat für das Endziel „Deponiewald“ eine Schichtmächtigkeit von mindestens 2,0 m notwendig ist. Zusätzlich zu prüfen ist, ob Maßnahmen zur Begrenzung des Wurzeltiefenwachstums zu ergreifen sind.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt liegen erste Erkenntnisse hinsichtlich der Dimensionierung von Rekultivierungsschichten (besonders unter dem Aspekt Wasserhaushaltsschicht) vor. Diese stellen aber noch keine einheitliche wissenschaftlich-technische Grundlage für den Umgang mit Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschichten dar. Es lassen sich Tendenzen ableiten, wonach mit einer Mächtigkeit des Rekultivierungsbodens von 1,0 m (DepV [2009]) keine ausreichende Sicherheit für die Langzeitfunktionalität eines Oberflächenabdichtungssystems gegeben ist. Nach EGLOFFSTEIN und BURKHARDT [2004] ist eine Mindestmächtigkeit von 1,5 m schlüssig zu begründen. Unter diesem Aspekt ist in der DepV [2009] eine Mindestmächtigkeit für eine Wasserhaushaltsschicht von 1,5 m festgelegt.

Die Bemessung der Rekultivierungsschicht ist in Verbindung mit dem Aufbau des Gesamtsystems, den verwendeten Bodenarten, den Einbaubedingungen, der Geometrie, der geplanten Folgenutzung, dem geplanten Bewuchs und dem Gefährdungspotenzial zu konzipieren [EGLOFFSTEIN & BURKHARDT, 2004].

In Anlehnung an die Ausführungen in AG BODEN [2005] kann zur Berechnung des pflanzenverfügbaren Wasserpotenzials im Rekultivierungsboden (Vernachlässigung des Grundwassereinflusses) nachfolgende Gleichung 2 herangezogen werden [WITT & RAMKE, 2006, verändert].

$$W_{Pfl} = nFK \cdot wW_P = \sum nFK_i \cdot wW_{Pi} \quad (2)$$

W_{Pfl} ... pflanzenverfügbares Bodenwasser [mm]; nFK ... nutzbare Feldkapazität [mm/m];

wW_P ... wirksame Durchwurzelungstiefe [m]; i ... Index der Schicht oder Lage

Unter der wirksamen Durchwurzelungstiefe wird die maximale Bodentiefe verstanden, bis zu der die Pflanzenwurzeln dem Boden noch Wasser entziehen können [WITT & RAMKE, 2006].

2.2.4 Anforderungen an den Bewuchs auf Wasserhaushaltsschichten

Der Bewuchs bildet das oberste Element des Oberflächenabdichtungssystems und spielt insbesondere als Wasserhaushaltsregulator und als Erosionsschutz eine wichtige Rolle. Weiterhin bindet er das Deponiebauwerk in die Umgebung ein und erfüllt eine wesentliche landschaftsgestalterische Funktion. Daher sind an die Vegetation vielfältige und teilweise konkurrierende Anforderungen aus Sicht von Deponietechnik und Umweltvorsorge zu stellen [WATTENDORF, 2001]:

- Schutz der Rekultivierungsschicht vor Bodenerosion
- Erhöhung der Standsicherheit durch die Aufnahme von Zug- und Scherspannungen durch die Pflanzenwurzeln im Boden
- Optimierung des Wasserhaushalts der Oberflächenabdichtung
- keine Beeinträchtigung von Entwässerungsschicht und Dichtung
- geringer Nachsorgeaufwand
- Stress- und Störungstoleranz.

Bei der Herstellung von qualifizierten Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschichten ist zu berücksichtigen, dass anthropogen beeinflusste Standorte ein ungestörtes Gedeihen von Pflanzen (z. B. aufgrund von Bodenaus-, -um- und -einbau und damit einhergehende Änderungen der Bodenluft- und -wasserhaushaltes) nicht uneingeschränkt zulassen.

Das bedeutet, dass es den standortunabhängigen Bewuchs für alle Deponien nicht gibt. Dies gilt nicht nur wegen unterschiedlicher Standorteigenschaften (Boden, Klima, Exposition, Hangneigung, usw.), sondern auch dahingehend, welche Funktionen (z. B. Langzeitsicherheit, Wasserhaushalt, geringer Nachsorgeaufwand) im Einzelfall stärker gewichtet werden. Grundsätzlich kommen folgende Pflanzenbestände in Frage [WATTENDORF, 2001]:

- **Grünland (Gras-/Kräuterbewuchs)** als Bewuchs bei temporären Abdeckungen oder bei langfristiger Zugänglichkeit der Deponieoberfläche,
- Gehölzdominierte **Buschvegetation (Sträucher)** vermindert die Absickerung aus der Rekultivierungsschicht wirksamer als Grünland, bedingt aber einen höheren Pflegeaufwand,
- **Waldbestände** können auf Deponieoberflächen die höchste Verdunstung erreichen. Sie erfordern aber entsprechend dimensionierte Rekultivierungsschichten und eine lange Entwicklungszeit.

Da Wälder in Mitteleuropa auf fast allen Standorten die natürlichen Endstadien der Sukzession bilden, lösen sie langfristig alle zuvor genannten Pflanzengemeinschaften ab.

Bereits im Rahmen der Vorplanungen für eine Oberflächenabdichtung sind Aspekte der späteren Vegetation zu beachten und in die Planung zu involvieren. Es sind frühzeitig bautechnische, bodenmechanische aber auch boden- und pflanzenkundliche Sachverhalte zu berücksichtigen und gleichwertig zu behandeln [SCHABER-SCHOOR, 2005].

Durch eine gezielte Pflanzenauswahl (Beachtung des Bundesnaturschutzgesetzes [BNatSchG, 2009]) können die Prozesse der Transpiration und Interzeption maximiert werden [DELFS, 1954; LFUG, 1999]. Vor allem die Durchwurzelungstiefe und -intensität der Vegetation sind von wasserhaushaltlicher Bedeutung [KONOLD et al., 2005].

Die Durchwurzelung eines Bodens ist nur selten annähernd homogen. Die Wurzelverzweigung ist zwar genetisch determiniert, wird aber stark durch das lokale Wasser- und Nährstoffangebot modifiziert. Das Wachstum der Pflanzenwurzeln strebt den benötigten Ressourcen entgegen [ROBINSON, 1994]. Liegt eine gute Nährstoffversorgung im Boden vor, so entwickelt sich ein kompakt verzweigtes aber nicht zu tiefes Wurzelsystem.

Bei Nährstoffmangel werden die Wurzeln länger aber weniger verzweigt [WIERSUM, 1958; FREY & LÖSCH, 2004].

2.2.5 Bodenkundliche Anforderungen an Wasserhaushaltsschichten

Neben dem Bewuchs spielt die gezielte Bodenauswahl eine große Rolle für die Funktionalität des Gesamtsystems Wasserhaushaltsschicht. Grundsätzliche Eigenschaftsunterschiede zwischen den Böden sind in Tabelle 4 dargestellt.

Dabei sind konkrete Anforderungen an die Oberboden- (Versickerungshorizont) und Unterbodenschicht (Wasserspeicherhorizont) zu stellen.

Tabelle 4: Ausgewählte Eigenschaften von Böden unterschiedlicher Korngrößenzusammensetzung [MARTIN & SAUERBORN, 2006]

Boden- charakteristik	Wasser- führung und Durchlüftung	Wasserhalte- und Sorptions- potenzial	Nährstoff- gehalt	Durchwuzel- barkeit	Bearbeit- barkeit
Boden mit hohem Sandanteil	hoch	gering	gering	gut	gut
Boden mit hohem Schluffanteil	mittel	mittel	mittel - hoch	mäßig	mäßig - gut
Boden mit hohem Tonanteil	gering	hoch	hoch	mäßig - schlecht	schlecht

Grundsätzlich geeignete Bodenarten sind in Tabelle 5 ausgewiesen [REITER & MÜLLER, 2007; EGLOFFSTEIN et al., 2009].

Tabelle 5: Auswahl geeigneter Böden für eine Wasserhaushaltsschicht [EGLOFFSTEIN et al., 2009]

Bodenart	AG Boden	DIN 4022	DIN 18196	nFK ¹ [Vol.-%]	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]
schwach toniger Schluff	Ut2	U,s,t' - U,t'	UL, UM, TL	26	8 - 12	65 - 92	0 - 27
mittel toniger Schluff	Ut3	U, s, t - U, t	UL, UM, TL	25	12 - 17	65 - 88	0 - 23
sandiger Schluff	Us	U+S - U, s', t''	SU*, UL, UM	25	0 - 8	50 - 80	12 - 50
sandig - lehmiger Schluff	Uls	U, s, t - U, s, t'	UL, UM, TL	22	8 - 17	50 - 65	18 - 24
stark schluffiger Sand	Su4	S+U - S+U, t''	SU*, UL, UM	23	0 - 8	40 - 50	42 - 60
schluffig - lehmiger Sand	Slu	S+U, t - S+U, t'	SU*, ST*, UL-TM	21	8 - 17	40 - 50	33 - 52
schwach sandiger Lehm	Ls2	U+S, t - U, s, t	SU*, UL- UM	16	17 - 25	40 - 50	25 - 43
mittel sandiger Lehm	Ls3	S+U, t - U+S, t	SU*, ST*, UL-TM	16	17 - 25	30 - 40	35 - 53
stark sandiger Lehm	Ls4	S, u, t	SU*, ST*, UL-TM	16	17 - 25	15 - 30	45 - 68
schwach toniger Lehm	Lt2	U+S, t* - T, u, s	ST*, UM- TA	14	25 - 35	30 - 50	15 - 45
sandig - toniger Lehm	Lts	S, t, u - T, u, s	ST*, UM- TA	14	25 - 45	15 - 30	25 - 60
schwach lehmiger Sand	Sl2	S, u, t' - S, u', t'	SU, SU*	18	5 - 8	10 - 25	67 - 85
mittel lehmiger Sand	Sl3	S, u*, t' - S, u', t'	SU, SU*, ST*	18	8 - 12	10 - 40	48 - 82
stark lehmiger Sand	Sl4	S, u*, t - S, u, t'	SU, ST, SU*, ST*	18	12 - 17	10 - 40	43 - 78

Bodenart	AG Boden	DIN 4022	DIN 18196	nFK ¹ [Vol.-%]	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]
schwach toniger Sand	St2	S, t', u'- S, t'	SU, ST	16	5 - 17	0 - 10	73 - 95
mittel toniger Sand	St3	S, t, u	SU, ST	15	17 - 25	10 - 15	60 - 83

¹ nFK-Werte bei einer mittleren Trockendichte ($1,45 < \rho_d < 1,65 \text{ g/cm}^3$)

Beim Oberboden ist besonders auf den Humusanteil zu achten. Regionale Knappheit humoser Böden bedingt teilweise das Zumischen von Kompost, wodurch die Humusbildung begünstigt, die nFK erhöht und die Keimfähigkeit verbessert wird [MAIER-HARTH et al., 2005]. Grundvoraussetzung ist die Einhaltung der Anforderungen (z. B. Bodenchemie) nach Anhang 3, Nr. 2 der DepV [2009] und nach Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) [1999].

Schluffige und lehmige Böden eignen sich am besten als Unterboden. Dabei ist der Tonanteil gering zu halten. Diese Böden sind charakterisiert durch ein hohes Wasserspeichervermögen, eine gute Durchwurzelbarkeit sowie eine geringe Schrumpfunggefährdung [MELCHIOR, 2010]. Ein Grobbodenanteil (max. 30% mit einem Korndurchmesser von $> 2 \text{ mm}$) erweist sich in Böschungsbereichen durch die Erhöhung des Reibungswinkels als vorteilhaft.

Des Weiteren schützt der Grobbodenanteil als Stützkorn vor zu hohen Verdichtungen. Nachteilig ist die Reduzierung der Speicherkapazität für Wasser und die Erhöhung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit [MAIER-HARTH, 2005].

Neben der Berücksichtigung von wasserhaushaltlichen und vegetationsspezifischen Kennwerten spielt die Bodenauswahl eine entscheidende Rolle bzgl. der Standsicherheitsbetrachtung in Böschungsbereichen [QIAN et al., 2001]. Die Untersuchungen von KONOLD et al. [2004] zeigen, dass bei Hangneigungen $< 1:2,5$ Bodenarten mit bis zu 25 Masse-% Ton als standsicher angesehen werden können. Dies bedingt aber den unverdichteten Einbau.

Diese Abschätzung lässt sich mit Hilfe des Feinbodenartendreiecks [AG BODEN, 2005] in Abbildung 6 realisieren. Es ersetzt keine Scherversuche (Standsicherheitsversuche) im klassischen Sinne [KONOLD et al., 2004].

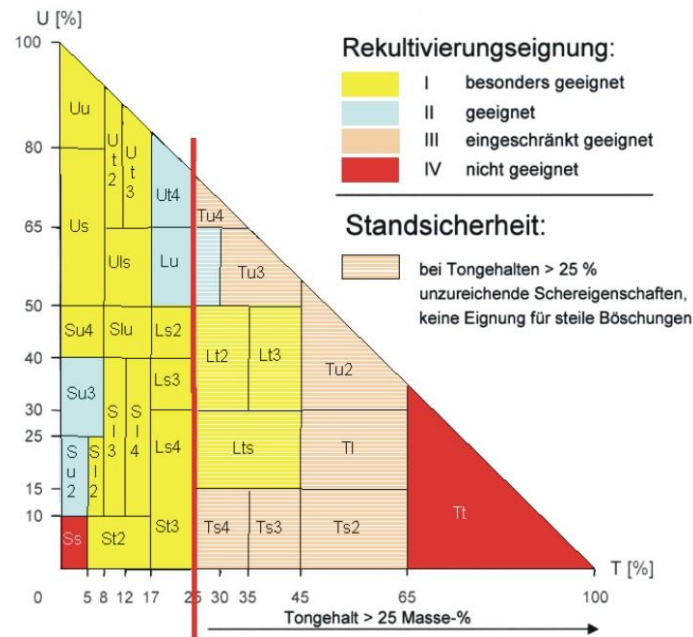


Abbildung 6: Eignung von Böden für die Rekultivierungsschicht einer Deponieoberflächenabdichtung auf Basis der Körnungszusammensetzung [KONOLD et al., 2004]

Für Böschungsbereiche wird unter dem Aspekt der Standsicherheit von tonigen Lehmen abgeraten. Reine Tone und reine Sande sind nicht als Rekultivierungsböden geeignet [KONOLD et al., 2004].

Alle notwendigen Analysen im Rahmen der Eignungsprüfung der Böden sind in der GDA-Empfehlung E2-31 zusammengestellt [WITT & RAMKE, 2006].

2.2.6 Einbauverfahren zur Herstellung von Wasserhaushaltsschichten

Prinzipiell führt jede Umlagerung von Bodenmaterialien zu Veränderungen des Porenvolumens, der Porengrößenverteilung und der Bodenverdichtung. Eine Verdichtung sowie eine Vernässung des Bodens sind im Rahmen der Einbaumaßnahmen zu minimieren. Um Gefügebeeinträchtigungen bzw. -veränderungen so klein wie möglich zu halten, sollten die Arbeiten nur bei den der Bodengruppe entsprechenden Konsistenzen ausgeführt werden (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Eignung von Böden zum Einbau in Abhängigkeit vom Feuchtezustand (DIN 19731 [1998]) und der Konsistenz (DIN 19682-5 [2007]) bei bindigem Material [LFUG, 1999]

Feuchtezustand	Konsistenz	Eignung zum Einbau
trocken bis schwach feucht	halbfest	optimal
feucht	steifplastisch	tolerierbar
stark feucht	weich bis breiig	unzulässig

Als optimal erweist sich ein Einbau im Vor-Kopf-Verfahren mit Hilfe von Radladern, wobei die notwendigen Befahrungen auf die Fahrtrasse beschränkt werden sollen. Verdichtungen aus dem Einbauprozess sind gemäß DIN 1185 [1973] zu beseitigen [LFUG, 1999].

Eine Zusammenfassung möglicher Verfahren zum unverdichteten Einbau von Rekultivierungsschichten ist in Tabelle 7 aufgezeigt. Das standortspezifische Einbauverfahren ist anhand der zu erreichenden Einbaukennwerte und der Vor-Ort-Bedingungen auszuwählen.

Tabelle 7: Auswahl von Einbauverfahren für den unverdichteten Bodeneinbau [KONOLD et al., 2005]

Verfahren	Aufwand	Verdichtung
Transportband/Absetzer	hoch	praktisch keine
Teleskop-/Langarmbagger	hoch	praktisch keine
Einschieben mit leichter Raupe	gering	im Oberboden

Bei dem Testfeldbau auf der Deponie Leonberg kam der Einbau (eine Lage Rekultivierungsmaterial) mittels Raupe zum Einsatz. Die dabei auftretenden Verdichtungen beschränken sich ausschließlich auf den Oberboden und sind weniger schädlich als Verdichtungen des Unterbodens [KONOLD et al., 2005].

Auswertung von MELCHIOR [2010] hinsichtlich der Planungen und Fremdüberwachungen von Rekultivierungsschichten in einem Zeitraum von ca. 10 Jahren machen deutlich, wie bedeutend die Prüfung des Materials hinsichtlich seiner spezifischen Kennwerte unter Beachtung des maschinellen Bodeneinbaus ist. Dabei wird offensichtlich, dass nicht bei jeder Bodenart eine Erhöhung der Einbaudichte zwangsläufig zu einer Reduzierung der Luft- und nutzbaren Feldkapazität führt. Bei einem schwach schluffigen Sand konnte bei einer Verdichtung (bis D_{Pr} von 95%) eine ausreichende Luftkapazität festgestellt werden. Dies verdeutlicht, dass die n_{FK} nicht grundsätzlich vom Verdichtungsgrad abhängig ist [MELCHIOR, 2010].

2.2.7 Qualitativer Einfluss biotischer Einflussfaktoren auf Wasserhaushaltsschichten

Sehr gute Indikatoren für die Qualität einer Wasserhaushaltsschicht stellen die Durchwurzelung sowie das Vorkommen und die Verteilung von Regenwurmpopulationen dar. Gut aggregierte und durchlüftete Böden zeigen eine tiefreichende Durchwurzelung sowie zahlreiche Regenwürmer.

Im Gegensatz zu abiotisch gebildeten Röhren/Rissen (durch Trocken- und Frostrisse) in den Rekultivierungsböden haben biotisch entstandene Röhren (durch Wurzeln und Tiere) häufig einen Anschluss an die Bodenoberfläche. Sie sind aufgrund stärkerer randlicher Verfestigungen dauerhafter als technisch erzeugte oder abiotisch entstandene Röhren [EHRMANN, 2005].

Der quantitative Einfluss von biologischen Faktoren ist zeitabhängig zu betrachten. Durch den Einbau, die „Einschwingphase“ sowie die Entwicklung der Flora und Bodenfauna wird die Wasserhaushaltsschicht und deren Funktionalität bestimmt. Hierbei spielen spezifische

Faktoren (z. B. Witterungseinflüsse, Bewuchspflege, Nährstoffangebot des Bodens) eine Rolle [FREY & LÖSCH, 2004].

Aufgrund der Standortspezifität des biologischen Einflusses auf die Funktionalität einer Wasserhaushaltsschicht lassen sich keine allgemein gültigen Tendenzen ableiten. Es ist davon auszugehen, dass die endgültige Funktionalität einer Wasserhaushaltsschicht erst nach dem Abschluss der „Einschwingphase“ des Systems sukzessive erreicht werden kann. Dabei wird die Hydrologie der Wasserhaushaltsschicht stark von der Art und dem Verdunstungspotenzial der Vegetation sowie von der Bodenart und dem sich einstellenden Porensystem bestimmt.

3 Experimentelle Untersuchungen

Wissenschaftliche Arbeiten und Veröffentlichungen befassen sich seit mehreren Jahren mit der Problematik der Wassertransportphänomene in kompletten und komplexen Abdichtungssystemen und einzelnen -elementen sowie den grundsätzlichen Eigenschaften von Dichtungselementen. Die Basis der meisten Untersuchungen stellt Labor- und Feldversuche dar. Computergestützte Simulationsrechnungen (z. B. mit BOWAHALD, HELP, HYDRUS) haben dabei in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen.

3.1 Untersuchungsmaßstab

Seit dem Bau des ersten Lysimeters, das dem französischen Mathematiker und Meteorologen DE LA HIRE um 1688 zugeschrieben wird, haben sich Lysimeter zu einem anerkannten Werkzeug zur Erforschung der Wasserbewegungen und des Transports gelöster Stoffe in der ungesättigten Zone entwickelt [SCHRÖDTER, 1985; MEISSNER et al., 2000]. Deren Ergebnisse sind ein Hilfsmittel zur Plausibilitätsprüfung von Labor- und Simulationsdaten [BENSON et al., 1994; MAILE, 1997; DWYER, 2003; SCHOENHERR et al., 2011]. Testfelder und Lysimeter stellen eine Möglichkeit dar, u. a. unterschiedlichste Sicherungssysteme unter natürlichen Bedingungen und Einflüssen langzeitorientiert zu untersuchen und zu bewerten [KEESE & KNAPPE, 1996].

Neben labortechnischen und theoretischen Herangehensweisen sind für eine langzeit- und wirksamkeitsorientierte Element- und Systembewertung entsprechende Feldversuche unter standortspezifischen Klimabedingungen erforderlich. Die Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz auf dem Gelände der Deponie Bautzen/Nadelwitz stellt eine derartige Freilandversuchstation dar.

Ergänzt werden die Untersuchungen durch parallel laufende Messungen an einem Lysimeter am Standort Zittau (Zittauer Ökologische Forschungsstation – ZÖF) und Laboruntersuchungen im Geotechniklabor der HTW Dresden.

3.2 Standortbeschreibung

Die Lysimeteranlage wurde auf dem Deponiegelände der Verbandsdeponie Bautzen/Nadelwitz des Regionalen Abfallverbandes Oberlausitz/Niederschlesien (RAVON) in der Nähe der ostsächsischen Stadt Bautzen errichtet. Diese RAVON-Deponie grenzt unmittelbar an den östlichen Stadtrand von Bautzen. Sie fungierte bis in das II. Quartal 2005 als Hausmülldeponie für die Stadt Bautzen und Umgebung. Folgende geographische Kenndaten charakterisieren den Standort eindeutig:

- Norden: HW: 5463120 RW: 5672256
- Süden: HW: 5463154 RW: 5671740
- Osten: HW: 5463215 RW: 5671853
- Westen: HW: 5462936 RW: 5672004

Gemäß der Topografischen Karte (TK) 25, Blatt 4852, liegt die Deponie am Südhang des Schafberges (201,4 m ü. HN) und grenzt südlich an die Staatsstraße S 111 Bautzen - Görlitz [LOHSE, 2002].

3.3 Klimacharakteristik

Für die Beurteilung des Wasserhaushaltes einer Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht ist die Erfassung und Bewertung des Klimas am Untersuchungsstandort erforderlich. Der Niederschlag, die Verdunstung und die Versickerung sind wesentliche Bestandteile der Wasserhaushaltsgleichung und somit Elemente zur Gesamtbeurteilung einer Wasserhaushaltsschicht.

3.3.1 Lokale Klimacharakteristik

Durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) wird die Station 10499 am Standort Görlitz (238 m ü. NN, geogr. Länge 14,95° O, geogr. Breite 51,188° N) für kontinuierliche Messungen betrieben. Dies ist der regionale DWD-Standort für die Oberlausitz. Er wird als Vergleichsstandort zum Untersuchungsstandort Bautzen genutzt. Da die Klimadatenerfassung auf dem Deponiegelände erst seit 1998 erfolgt und durch größere Datenverluste gekennzeichnet ist, wird die Charakterisierung der Witterung auf Basis der Daten der nahegelegenen Station Bautzen/Kubschütz (DWD-Station: 3. Ordnung) realisiert.

Der Standort Bautzen (Station Bautzen/Kubschütz, 210 m ü. NN, geogr. Länge 14,44° O, geogr. Breite 51,167° N) ist durch einen mittleren Jahresniederschlag von 675 mm (Zeitraum

1961-1990) charakterisiert. In Görlitz wurden im gleichen Zeitraum im Durchschnitt ein Jahresniederschlag von 657 mm/a ermittelt. Dies liegt im Bereich der von HEINKE [2010] veröffentlichten Jahresniederschlagsmenge für Görlitz. In Abbildung 7 ist ein Klimadiagramm für den DWD-Standort Görlitz aufgezeigt.

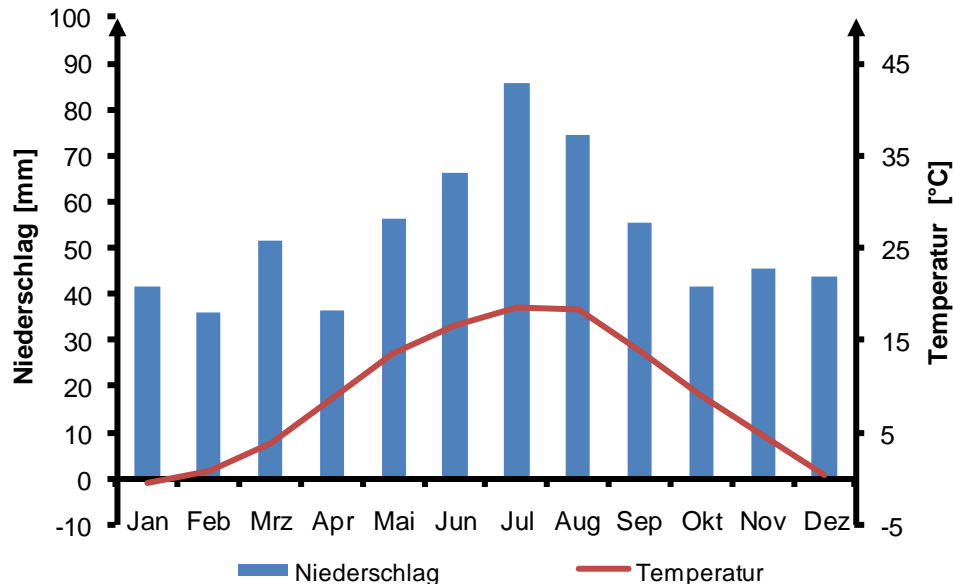


Abbildung 7: Klimadiagramm nach WALTER und LIETH für den Standort Görlitz (1961-1990) [DWD, 2010]

Gekennzeichnet ist die Station Görlitz durch ein Maximum der mittleren monatlichen Niederschlagsmenge im August von 75 mm. Das Minimum wird im Februar mit 37 mm erreicht. Charakteristisch für die Temperatur ist eine Amplitude von ca. 19 °C. Für den Standort Bautzen/Kubschütz liegen langjährige Klimadaten zu den Parametern Niederschlag und Temperatur vor (Tabelle 8), wobei die Niederschlagsdaten seit 1961 und Temperaturdaten seit 1991 aufgezeichnet werden.

Im Vergleich der Stationen Bautzen/Kubschütz und Görlitz ist erkennbar, dass eine gute Übereinstimmung der monatlichen mittleren Niederschlagsmengen vorliegt (Abbildung 8). Beide Stationen spiegeln die Charakteristik von Kontinentalklima (Niederschlagsmaximum im Sommer) wider.

Der Verlauf der mittleren monatlichen Niederschlagsmengen im Zeitraum 1991 bis 2009 verdeutlicht (Abbildung 8), dass der Monat März in Bautzen durch höhere Niederschlagsmengen (März: 54 mm) charakterisiert ist und im April eine deutliche Abnahme der Niederschlagsmenge (April: 35 mm) auftritt. Das Niederschlagsmaximum tritt im Monat Juli mit 76 mm auf. Bis Oktober nehmen die Niederschlagsmengen bis ca. 43 mm ab. Im November/Dezember liegen die mittleren monatlichen Niederschlagsmengen bei ca. 47 mm.

Tabelle 8: Vergleich der langjährigen meteorologischen Mittelwerte (Temperatur und Niederschlag) für die Standorte Bautzen/Kubschütz und Görlitz

Parameter	standortspezifische Werte für Bautzen/Kubschütz		standortspezifische Werte für Görlitz	
Zeitraum	01/1961 - 12/1990	01/1991 - 04/2010	01/1961 - 12/1990	01/1991 - 04/2010
Höhenangabe	210 m ü. NN	210 m ü. NN	238 m ü. NN	238 m ü. NN
Geogr. Länge	14,440° O	14,440° O	14,950° O	14,950° O
Geogr. Breite	51,167° N	51,167° N	51,188° N	51,188° N
Temperatur				
Jahresmitteltemperatur		9,4 °C	8,2 °C	9,0 °C
Maximum (Monat)		19 °C (Juli)	17,3 °C (Juli)	18,6 °C (Juli)
Minimum (Monat)		0,3 °C (Januar)	-1,5 °C (Januar)	-0,4 °C (Januar)
Amplitude (Maximum - Minimum)		18,7 °C (große Amplitude)	18,8 °C (große Amplitude)	18,8 °C (große Amplitude)
Frostperiode (Monate)		keine, ganzzjährig > 0 °C	Januar – Februar	Januar – Februar
Niederschläge				
Jahresniederschlag	675 mm	610 mm	657 mm	635 mm
Maximum (Monat)	72,9 mm (August)	76,1 mm (Juli)	74,2 mm (August)	85,8 mm (Juli)
Minimum (Monat)	43,1 mm (Februar)	34,8 mm (April)	36,8 mm (Februar)	35,8 mm (Februar)

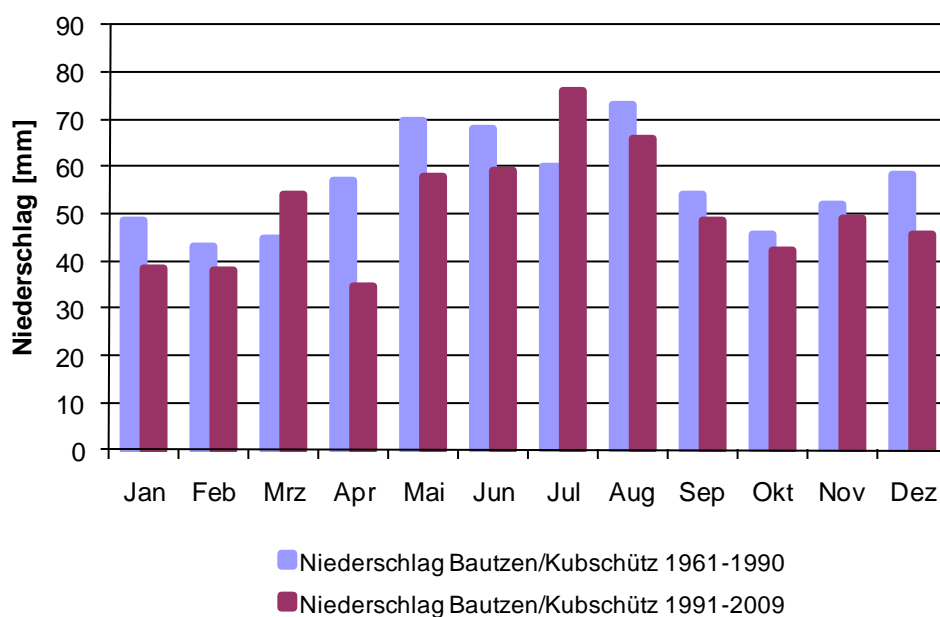


Abbildung 8: Vergleich der mittleren monatlichen Niederschlagsmengen am Standort Bautzen/Kubschütz für die Zeiträume 1961-1990 und 1991-2009

Der Vergleich macht die teilweise gegenläufige Entwicklung der Niederschlagsmengen sichtbar. Dies wird vor allem in den Monaten März/April und Juli/August deutlich. Insgesamt lässt sich dies durch den veränderten Einfluss von Großwetterlagen auf Sachsen erklären, was u. a. zu eher trockeneren Sommermonaten führt [SMUL, 2008].

Die Abbildung 9 zeigt den Temperaturverlauf über die Zeiträume 1961-1990 und 1991-2009. Die Jahresmitteltemperatur stieg bis 2009 um 0,8 °C an und kann für den Zeitraum 1991-2009 mit 9,0 °C ausgewiesen werden. Dies deckt sich mit den Untersuchungsergebnissen für den Freistaat Sachsen bezogen auf Ostsachsen [SMUL, 2008; KÜCHLER, 2010].

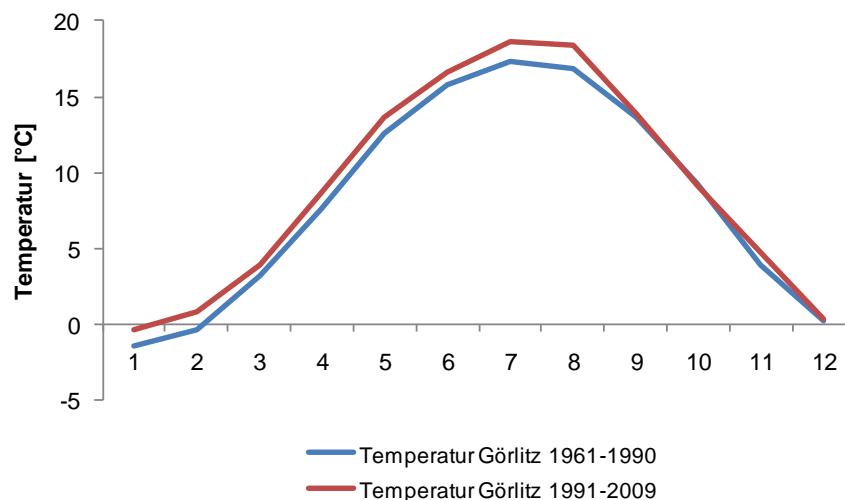


Abbildung 9: Temperaturverlauf für den Standort Görlitz in unterschiedlichen Zeiträumen

Die größten Temperaturzunahmen im Vergleich zum Zeitraum 1961 - 1990 sind in den Monaten Juli und August mit 1,4 °C aufzuzeigen. In den Monaten Januar und Februar des Zeitraumes 1961 - 1990 waren mittlere negative Temperaturwerte ermittelt worden. Lediglich im Januar des Zeitraumes 1991 - 2009 ist im Mittel noch mit negativen Temperaturen zu rechnen. Die Jahresmitteltemperatur der Station Bautzen/Kubschütz liegt seit 1991 bei ca. 9,4 °C. Fröste (Temperaturen < 0 °C) sind nur an einzelnen Tagen zu erwarten. Diese können deutlich in die negativen Temperaturbereiche vordringen.

Zusammenfassend kann die Region Bautzen als Übergangsbereich zum Kontinentalklima mit teilweisen maritimen Einflüssen charakterisiert werden. Typisch sind kühle und feuchte Frühjahre und Sommer und ein langer warmer Herbst. Die Winter zeichnen sich durch häufige, aber kurzzeitige Schneeperioden aus. Die Jahresmitteltemperatur liegt bei 8,5 °C und die mittlere Niederschlagsmenge pro Jahr bei 600 – 650 mm. Demnach kann das Klima in der Region Bautzen als mäßig trocken definiert werden [SCHMIDT, 1995]. Da die Gesamtwitterungssituation von Görlitz und Bautzen vergleichbar ist, sind allgemein abzuleitende Trends und Verläufe vom Standort Görlitz auf den Standort Bautzen übertragbar [SCHOENHERR et al., 2011].

3.3.2 Allgemeine Trends der Klimaentwicklung

Klimabedingte Veränderungen einer Region können ökologische und ökonomische Auswirkungen zur Folge haben [SMUL, 2008]. Im Mittel kann für Deutschland eine Zunahme der Niederschlagsmenge im Winter ausgewiesen werden. Im Sommer sind eher geringfügige Abnahmen der Niederschlagsmengen zu erkennen. Dies unterliegt regionalspezifisch starken Schwankungen.

Für den Freistaat Sachsen sind rückläufige Jahresniederschlagsmengen feststellbar [SMUL, 2005]. Im Vergleich der beiden betrachteten Zeiträume (1961-1990 und 1991-2009) kann für Ostsachsen und somit u. a. für die Region Bautzen eine Zunahme der mittleren Jahrestemperatur für den Zeitraum 1991-2005 um 0,7°C ausgewiesen werden. Dabei stiegen vor allem die Maximumtemperaturen im Frühjahr und im Sommer um 1,2 °C bzw. 1,0 °C an [SMUL, 2008; KÜCHLER, 2010]. Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge beläuft sich für die DWD-Station Bautzen/Kubschütz auf 610 mm und für die DWD Station Görlitz auf 635 mm (Tabelle 9).

Tabelle 9: Mittlere jährliche Niederschlagsmengen von Bautzen und Görlitz im Vergleich [DWD, 2010]

Standort	Zeitraum	mittlere jährliche Niederschlagsmenge [mm]
Bautzen / Kubschütz	1961 – 1990	675
	1991 – 2009	610
Görlitz	1961 – 1990	657
	1991 – 2009	635

Die Tabelle 9 verdeutlicht, dass die jährliche mittlere Niederschlagsmenge an beiden Stationen rückläufig ist. Die Ergebnisse bestätigen die mit verschiedenen regionalen Klimamodellen simulierten Tendenzen zu trockeneren Verhältnissen in der Region Bautzen/Kubschütz vor allem in den Frühjahrsmonaten (April/Mai) bzw. mit Beginn der Vegetationsperiode. Die Entwicklung des Niederschlags für ganz Sachsen zeigt eine Zunahme der Jahresniederschlagssumme im Zeitraum 1991-2005 im Vergleich zum Zeitraum 1961 - 1990. Auffallend ist die Änderung der Niederschlagsverteilung innerhalb eines Jahres. Das Frühjahr ist gekennzeichnet durch eine Abnahme der Niederschlagsmengen. In den Sommermonaten steigen die Niederschlagsmengen an [SMUL, 2008]. Die innerjährliche Niederschlagsverteilung weist zwei Maxima auf. Das höhere Maximum im Sommer und ein kleineres Maximum im Winter. Eine Abnahme der Niederschlagsmengen ist in den Frühjahrsmonaten zu verzeichnen. Für Sachsen ist die Abnahme der Schneedeckendauer und -mächtigkeit verbunden mit einer winterlichen Temperatur- und Niederschlagszunahme [SMUL, 2008]. Die Ergebnisse der Klimaauswertung und -charakterisierung für die Stationen Bautzen/Kubschütz und Görlitz decken sich mit den für Sachsen ausgewiesenen Trends [SMUL, 2008].

3.4 Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

Bei der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz handelt es sich um nicht wägbare Lysimeter (Gravitationslysimeter). Sie besitzen einen modifizierten Aufbau zu den Vorgaben nach FRIEDRICH und FRANZEN und repräsentieren den Stand der Technik in Deutschland [DVWK, 1980].

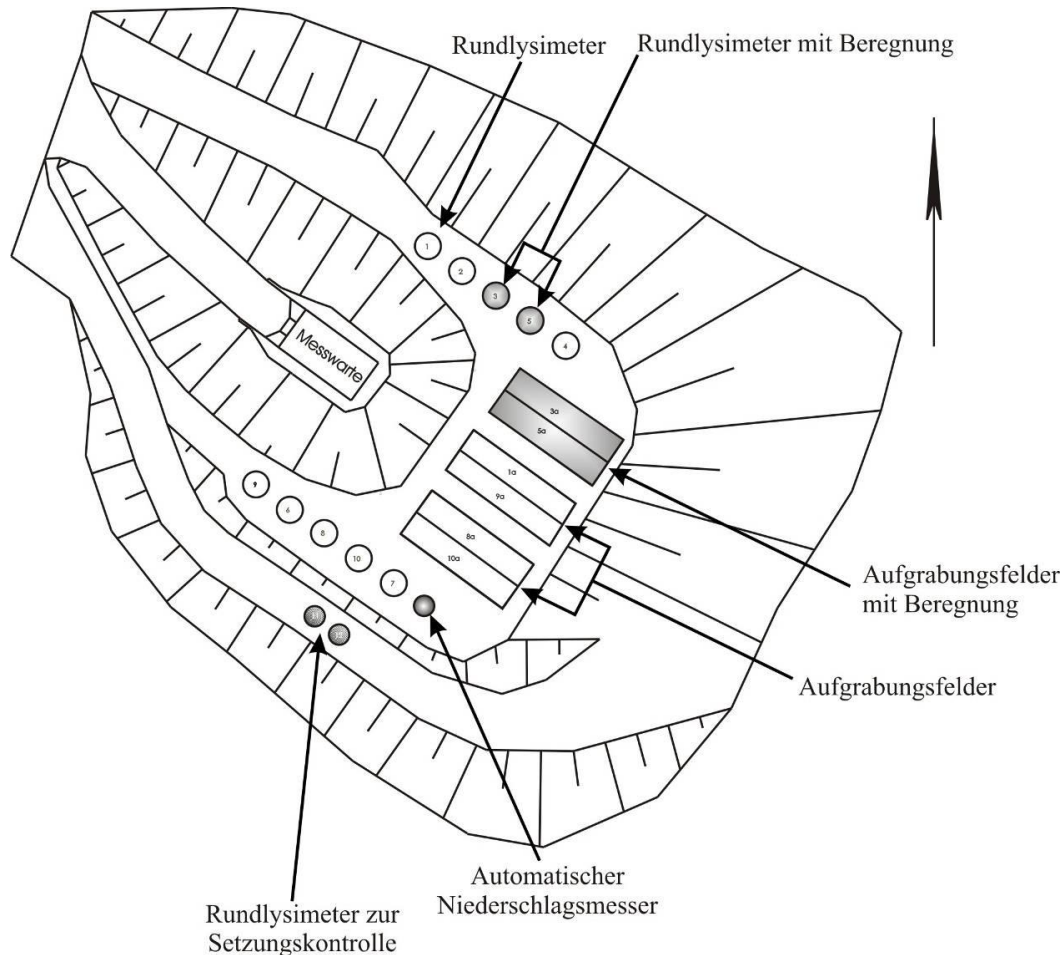


Abbildung 10: Grundriss der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz (nicht maßstabsgerecht)

3.4.1 Rundlysimeter und Aufgrabungsfelder

Die Gesamtanlage (Abbildung 10) besteht aus den vier primären Komponenten (Rundlysimeter, Aufgrabungsfelder, Messwarte, Niederschlagsmesseinrichtung).

Die Rundlysimeter dienen der Gewinnung von in-situ Messdaten zum Bodenwasserhaushalt und zum Setzungsverlauf. Sie sind aus Stahlbetonschachtringen (DIN 4035 [1995], wasserundurchlässig, verformungsstabil) mit einem Durchmesser von 1,5 m aufgebaut und variieren in der lichten Tiefe zwischen 1,5 m und 3,5 m. Die Querschnittsfläche umfasst ca. 1,77 m². Der untere Abschluss der Rundlysimeter 1 - 10 ist mit einem abwasserbeständigen Schachtboden mit glasfaserverstärkter Kunststoffschachtschale und einem 10% geneigtem Gerinne zu einem Tiefpunkt am Rand realisiert. An diesem Tiefpunkt wird das

anfallende Sickerwasser über ein Kunststoffrohrstück aus dem Lysimeter herausgeführt und über Sickerwasserleitungen in die Messwarte abgeleitet und gesammelt.

Alle Rundlysimetersegmente sind durch elastomere Dichtringe und einen speziellen Fugendichtspachtel fest miteinander verbunden. Um einen Wasserdurchtritt durch die porösen Innen- und Außenseiten der Schachtringe auszuschließen, wurden diese mehrfach mit einem Bitumenanstrich versehen (siehe Abbildung 11 und Abbildung 12). Die modifizierten Lysimeterinnenwände können als hinreichend dicht gegenüber Wasser angesehen werden. Mittels Dichtheitsprüfung (DIN 1986 [1989]) ist die Dichtigkeit der Rundlysimeter 1 - 10 bestätigt worden. Mögliche Randumläufigkeiten sollen durch eine dachförmige Edelstahlverblendung und der elastischen Innenauskleidung minimiert werden.



Abbildung 11: Schachtunterteil mit einbetonierter GFK-Schale der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz



Abbildung 12: Aufgesetzte Stahlbetonschachtringe der Rundlysimeter in Bautzen/Nadelwitz

Die Lysimeter stehen jeweils auf einem Einzelfundament aus unbewehrtem Beton. Die Rundlysimeter 11 und 12 sind ohne spezifisches Fundament, da sie ausschließlich der Plausibilitätsprüfung der Setzungsmessung (ohne Sickerwasserfassung) dienen. Sie stehen auf einer ebenen Betonfläche ohne bautechnische Zusatzelemente.

Parallel zu den Rundlysimetern umfasst die Versuchsanlage sechs äquivalent befüllte Aufgrabungsfelder. Diese dienen versuchsparallelen Probenahmen zur Bestimmung von bodenmechanischen, bodenkundlichen, vegetationsspezifischen und geohydraulischen Eigenschaftsänderungen.

Die 7,5 m langen und 1,5 m breiten Aufgrabungsfelder (Abbildung 13) sind in Holzspundbauweise errichtet. Zur optimalen Vergleichbarkeit wurden die Schichtmächtigkeiten und die Einbaudichten analog denen der Rundlysimeter eingebaut.



Abbildung 13: Bodeneinbau in die Aufgrabungsfelder der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

Der im Aufgrabungsfeld befindliche Boden liegt über einer Entwässerungsschicht. Dadurch kann die Bildung von Staunässe vermieden werden. Einen separaten Ablauf zur Sickerwasseranalyse gibt es nicht. Das in der Drainage ankommende Sickerwasser wird im anstehenden Erdreich (k_f -Wert: ca. 10^{-4} m/s) zur Versickerung freigegeben.

Als Rekultivierungsboden werden ein breites Spektrum an verschiedensten Bodenarten genutzt. Im Rahmen der Bodenauswahl wurden mehrere regional anstehende Böden auf ihre Eignung als Wasserhaushaltsschicht beprobt, begutachtet und chemischen sowie geotechnischen Untersuchungen unterzogen.

Die geotechnischen Eignungsuntersuchungen erfolgten im Geotechnik-Labor der HTW Dresden. Zur Eignungsbeurteilung und Charakterisierung wurden die Böden dem Untersuchungsprogramm in Tabelle 10 unterzogen. Die Kapillarspannungs-Sättigungs-Beziehung wurde mittels Druckplattenextraktor bestimmt [DÖRING, 2007]. Des Weiteren wurden Reibungswinkel, Kohäsion, Durchlässigkeit und Steifemodul bestimmt und in DÖRING [2007] ausgewertet.

Aufgrund dieser Untersuchungen wurden für die Lysimeter zwei Böden (bindiger und gemischtkörniger) als Unterbodenmaterial ausgewählt. Das Oberbodenmaterial ist auf allen Lysimetern identisch.

Diese Böden sind zwar häufig verfügbar und werden in der Praxis auch eingesetzt, wurden in der wissenschaftlichen Literatur allerdings bisher eher als untypisch für den Einsatz in einer Wasserhaushaltsschicht angesehen.

Tabelle 10: Auswahl der Eignungsuntersuchungen für die Böden der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz im Geotechnik-Labor der HTW Dresden

Versuch	Norm	Boden		
		Oberboden	bindig	gemischt-körnig
Wassergehalt	DIN 18121	✓	✓	✓
Fließ- und Ausrollgrenze	DIN 18122-1		✓	
Korngrößenverteilung	DIN 18123	✓	✓	✓
Korndichte	DIN 18124	✓	✓	✓
Dichte	DIN 18125	✓	✓	✓
Proctorversuch	DIN 18127	✓	✓	✓
Glühverlust	DIN 18128	✓	✓	
Kalkgehalt	DIN 18129		✓	
Wasserrückhaltevermögen	DIN 18132		✓	

Die chemischen Analysen erfolgten in den Laboratorien der WESSLING GmbH in Dresden. Die Ergebnisse zeigen, dass die eingebauten Böden die Anforderungen des Anhangs 3 der DepV [2009] erfüllen.

Die Rundlysimeter 1, 2, 3, 4 und 10 sowie die Aufgrabungsfelder 1a, 3a und 10a sind mit dem bindigen Bodenmaterial (Lößlehm) in unterschiedlichen Schichtmächtigkeiten und Verdichtungsgraden befüllt (Abbildung 14). Die Rundlysimeter 5, 6, 7, 8 und 9 sowie die Aufgrabungsfelder 5a, 8a und 9a sind mit dem gemischtkörnigen Boden befüllt. Alle Lysimeter besitzen als oberste Schicht eine ca. 0,2 m mächtige Oberbodenschicht (Abbildung 14).

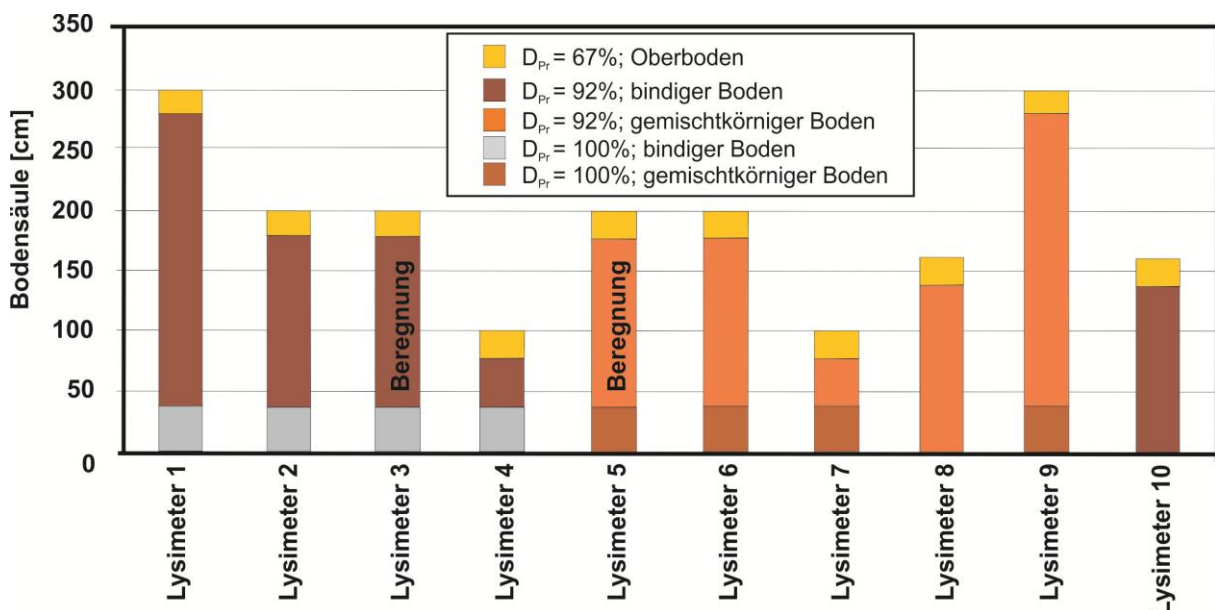


Abbildung 14: Aufbau der Bodensäulen in den Lysimetern (ohne untere Entwässerungsschicht) der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

Die Bodensäulen in den Aufgrabungsfeldern sind nahezu direkt in das vorhandene Erdreich eingebettet und den natürlichen Bedingungen einer Rekultivierungsschicht ausgesetzt. Die Aufgrabungsfelder 3a (bindiger Boden) und 5a (gemischtkörniger Boden) mit einer jeweiligen Bodensäule von 2,0 m sind zusätzlich mit einer automatischen Beregnungseinheit bestückt (Abbildung 15).



Abbildung 15: Beregnung auf den Aufgrabungsfeldern (links) und dem Rundlysimeter (rechts) der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

Die Beregnungseinheit wird in Abhängigkeit vom natürlichen Niederschlag automatisch gesteuert, so dass mit geringer Zeitverzögerung zusätzliche Beregnungsmengen auf die ausgewählten Rundlysimeter (3 und 5) sowie Aufgrabungsfelder (3a und 5a) aufgebracht werden.

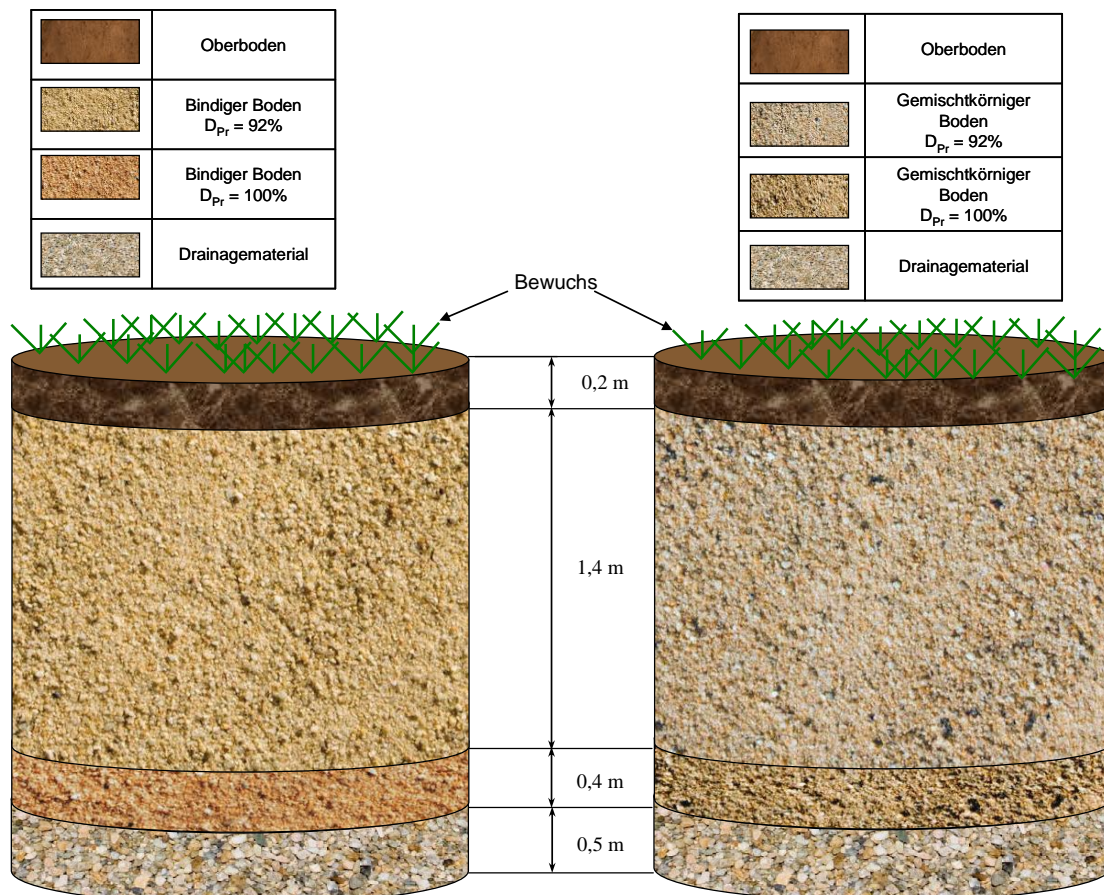


Abbildung 16: Vertikalschnitt durch die Rundlysimeter 2 (links) und 6 (rechts)

Ein Schnitt durch die Lysimeter 2 und 6 ist in Abbildung 16 aufgezeigt und verdeutlicht den prinzipiellen Aufbau der Lysimeter und Aufgrabungsfelder. Alle Lysimeter besitzen an der Basis eine ca. 0,5 m mächtige Entwässerungsschicht aus natürlichem mineralischem Drainagematerial. Im Nachfolgenden sind die eingebauten Böden auf Basis der Eignungsuntersuchungen detailliert charakterisiert.

3.4.2 Charakterisierung des Oberbodenmaterials

Die obersten 0,2 m der Lysimeter und Aufgrabungsfelder sowie im direkten Umfeld bestehen aus Oberbodenmaterial (Abbildung 17), welches einen Humusanteil von ca. 5% aufweist.

Das Material stammt aus der Kiesgrube der KGN Kiesgewinnung Nadelwitz GmbH in direkter Nachbarschaft zum Deponiegelände.

Für den Einbau wurden keine spezifischen Vorgaben ausgewiesen. Das Material wurde locker aufgeschüttet und schwach angedrückt (Schutz gegen Winderosion).

Der Verdichtungsgrad beim Einbau lag bei ca. 67%.

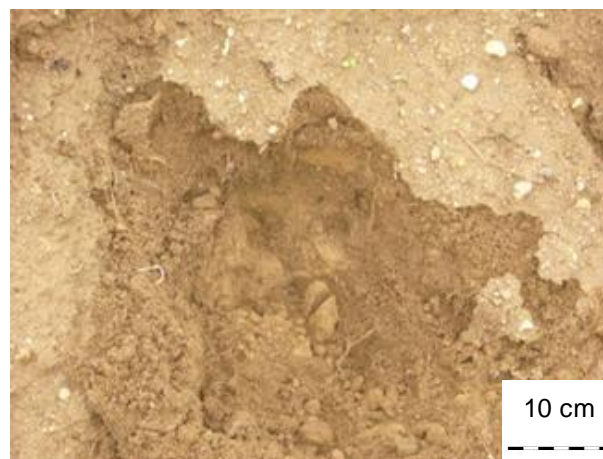
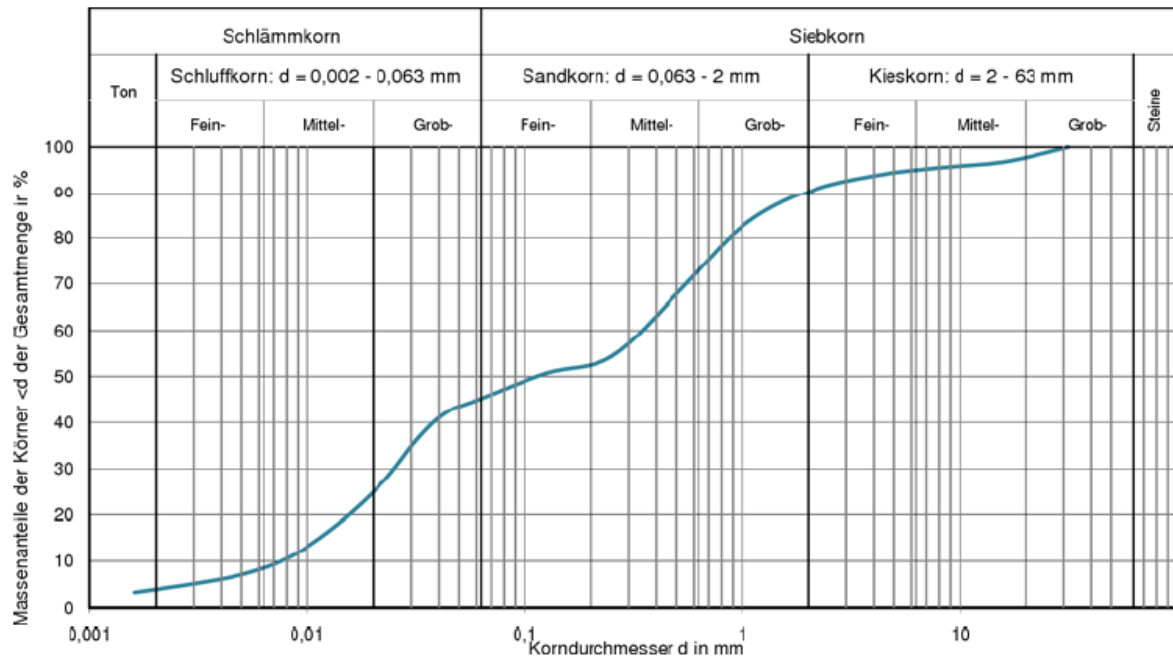


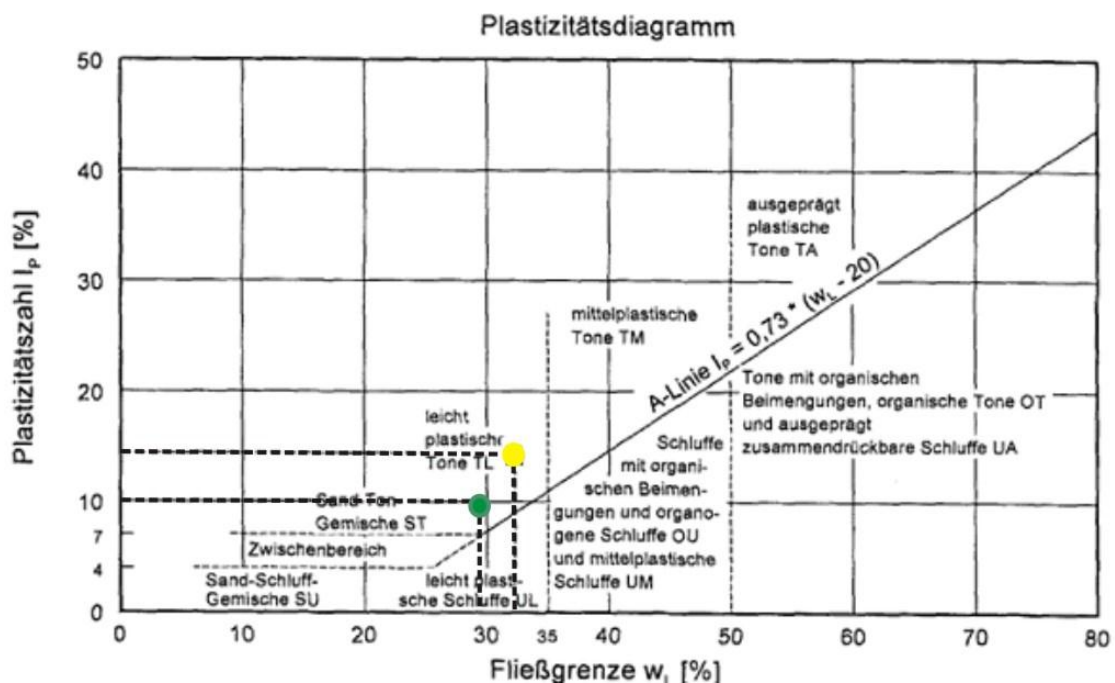
Abbildung 17: Detailansicht des **Oberbodens** für die Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

In Abbildung 18 ist die Korngrößenverteilung für den **Oberboden** dargestellt.

Das **Oberboden** setzt sich zu 4% aus Ton, zu 41 % aus Schluff, zu 45% aus Sand und zu 10% aus Kies zusammen. Für bindige Böden (Schlämmkornanteil > 40%) wird zur Charakterisierung das Plastizitätsdiagramm (Abbildung 19) verwendet.

Abbildung 18: Körnungslinie des **Oberbodens** in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

Der **Oberboden** mit einer Plastizitätszahl $I_P = 9,9\%$ kann nach DIN 18196 [1988] als plastisch charakterisiert werden. Da I_P oberhalb der A-Linie ($I_P = 0,73 \cdot (w_L - 20)$) im Plastizitätsdiagramm liegt, ist auch der bindige Boden als Tonboden zu klassifizieren [PRINZ & STRAUß, 2006].

Abbildung 19: Plastizitätsdiagramm des **Oberbodens** (grün) und des **bindigen Bodens** (gelb) in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz nach CASAGRANDE [SCHOENHERR et al., 2011; verändert]

Ableitend aus den einzelnen Prozentanteilen lässt sich der **Oberboden** gemäß Tabelle 11 klassifizieren.

Tabelle 11: Klassifizierung des **Oberbodens** in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

Norm/Arbeitsgrundlage	Bodenart	Abkürzung
DIN 14688-2 [2004]	mittel- bis grobsandiger, leicht kiesiger, leicht feinsandiger Schluff	msacsagr'fsa'Si
DIN 18196 [1988]	leicht plastischer Ton	TL
KA5*- AG Boden [2005]	stark schluffiger Sand	Su4

* Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage

Das **Oberboden**material lässt sich anhand der Proctorkurve (DIN 18127 [1997], Anlage 1.1) wie folgt charakterisieren:

- 100% Proctordichte: $\rho_{Pr} = 1,870 \text{ g/cm}^3$; optimaler Wassergehalt $w_{Pr} = 11,9\%$
- 97 % Proctordichte: $\rho_{Pr} = 1,814 \text{ g/cm}^3$; min./max. Wassergehalt $w = 9,4 / 13,6\%$
- 95 % Proctordichte: $\rho_{Pr} = 1,776 \text{ g/cm}^3$; min./max. Wassergehalt $w = 7,4 / 14,4\%$.

In Abbildung 20 ist die Kapillarspannungs-Sättigungs-Beziehung des **Oberbodens** der dargestellt. Aus ihr lassen sich folgende Kennwerte ableiten:

- Feldkapazität (FK): 30%
- permanenter Welkepunkt (PWP): 7%
- nutzbare Feldkapazität (nFK): 23%

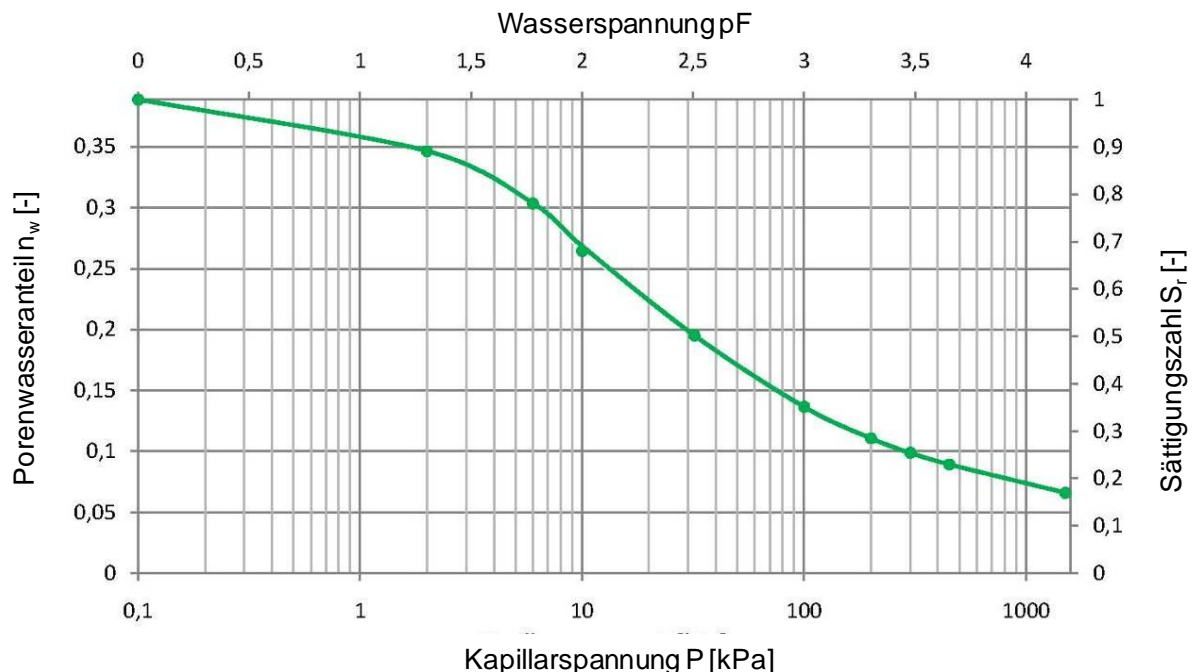


Abbildung 20: Kapillarspannungs-Sättigungs-Beziehung des **Oberbodens** in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz [DÖRING, 2007]

Der Wassergehalt bei Feldkapazität wird bei einer Wasserspannung von $pF = 1,8$ und der permanente Welkepunkt bei $pF = 4,2$ ermittelt. Aus der Differenz beider Wasserspannungen wird der Wassergehalt im Bereich der nutzbaren Feldkapazität berechnet. Die Bestimmungen erfolgen mittels Druckplattenextraktor nach dem DIN-ISO-11274-Verfahren [1998].

Das verwendete **Oberbodenmaterial** (Körnungslinie siehe Abbildung 18) entspricht den Empfehlungen des Arbeitskreises „Begrünung von Problemflächen“ der Forschungsanstalt für Landesentwicklung und Landschaftsbau e. V. (FLL) [FLL, 1998].

3.4.3 Charakterisierung des bindigen Bodens

Nach DIN 14688 [1997] kann der **bindige Boden** (Abbildung 21) als leicht toniger, leicht sandiger Schluff (cl'sa'Si) und nach DIN 18196 [2006] als leicht plastischer Ton (TL) deklariert werden. Der Boden stammt aus einer Baumaßnahme an der Bundesstraße B6 (Autobahnabfahrt A4 Salzenforst) in der Nähe der Stadt Bautzen.



Abbildung 21: Detailansicht des **bindigen Bodens** in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz
Am 09.10.2006 wurden Proben aus dem **bindigen Boden** an der Abbaustelle entnommen und den Eignungsuntersuchungen unterzogen. Die ermittelte Korngrößenverteilung und das Plastizitätsdiagramm nach CASAGRANDE des **bindigen Bodens** sind in Abbildung 22 und Abbildung 19 dargestellt.

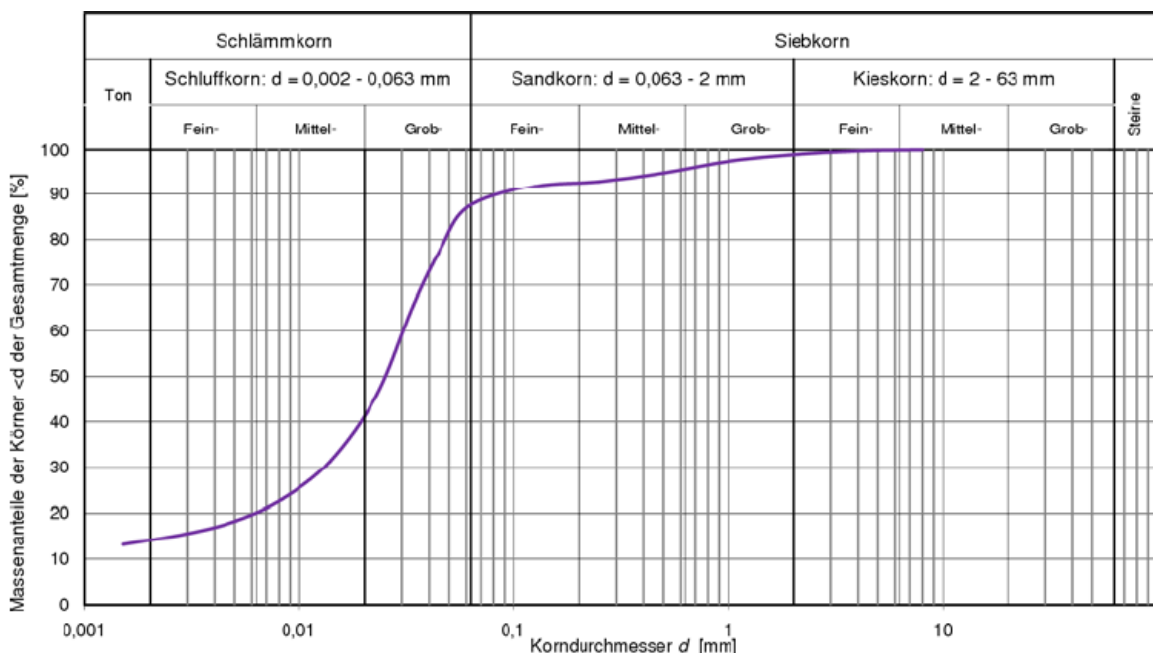


Abbildung 22: Körnungslinie des **bindigen Bodens** in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

Das **bindige Bodenmaterial** setzt sich zu 14% aus Ton, zu 74 % aus Schluff, zu 11% aus Sand und zu 1% aus Kies zusammen. Für **bindige Böden** wird in der Regel der d_{10} -Wert nicht ermittelt und somit keine Ungleichförmigkeitszahl berechnet.

Zur Charakterisierung von **bindigen Böden** wird das Plastizitätsdiagramm (Abbildung 19) verwendet. Der Boden ist als plastisch zu charakterisieren. Da I_p oberhalb der A-Linie im Plastizitätsdiagramm liegt, ist das Material als Tonboden zu klassifizieren. Entsprechend den einzelnen Prozentanteilen lässt sich der **bindige Boden** gemäß der unterschiedlichen Systeme (Tabelle 12) klassifizieren.

Tabelle 12: Klassifizierung des **bindigen Bodens** in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

Arbeitsgrundlage	Bodenart	Abkürzung
DIN 14688-2 [1997]	leicht toniger, leicht sandiger Schluff	cl'sa'Si
DIN 18196 [1988]	leicht plastischer Ton	TL
KA5*- AG Boden [2005]	mittel toniger Schluff	Ut3

* Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage

Die Proctorkurve für den **bindigen Boden** ist in Anlage 1.2 dargestellt. Die charakteristischen Kenndaten aus dem Proctorversuch lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- 100% Proctordichte: $\rho_{Pr} = 1,797 \text{ g/cm}^3$; optimaler Wassergehalt $w_{Pr} = 16,2\%$
- 97% Proctordichte: $\rho_{Pr} = 1,743 \text{ g/cm}^3$; min./max. Wassergehalt $w = 12,6 / 18,4\%$
- 95% Proctordichte: $\rho_{Pr} = 1,707 \text{ g/cm}^3$; min./max. Wassergehalt $w = 10,9 / 19,8\%$
- 92% Proctordichte: $\rho_{Pr} = 1,653 \text{ g/cm}^3$; min./max. Wassergehalt $w = 8,2 / 22,0\%$.

Um die Wasserspannungen im Bodenmaterial detailliert beschreiben zu können, wurde die bodenspezifische Kapillarspannung-Sättigungs-Beziehung aufgenommen (Abbildung 23).

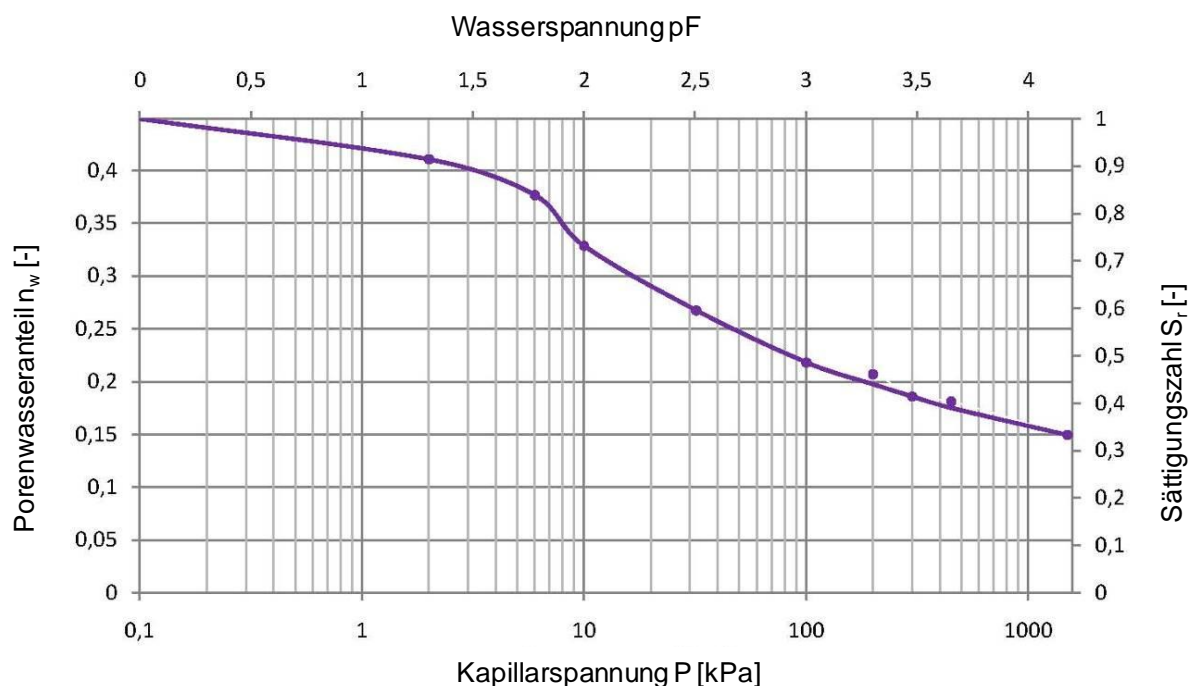


Abbildung 23: Kapillarspannungs-Sättigungs-Beziehung des bindigen Bodens in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

Aus der pF-Kurve in Abbildung 23 lassen sich folgende Kennwerte bzgl. des Wasserrückhaltevermögens des **bindigen Bodens** ($D_{Pr} = 92\%$) ableiten:

- Feldkapazität (FK): 38 %
- permanenter Welkepunkt (PWP): 15 %
- nutzbare Feldkapazität (nFK): 23 %

Das **bindige Bodenmaterial** besitzt einen Wassergehalt bei Feldkapazität ($pF = 1,8$) von 38 %. Der nicht mehr pflanzenverfügbare Wassergehalt beträgt 8% und liegt unterhalb der Druckstufe des permanenten Welkepunktes ($pF = 4,2$). Die Bestimmungen erfolgten mittels Druckplattenextraktor nach dem DIN-ISO-11274-Verfahren [2009].

3.4.4 Charakterisierung des gemischtkörnigen Bodens

Der **gemischtkörnige Boden** ist gemäß DIN 14688 [1997] als feinkiesiger, leicht schluffiger Sand (fgrsi´Sa) zu beschreiben. Auf Basis der Zustandsgrenzen handelt es sich hierbei nach DIN 18196 [2006] um einen schluffigen Sand (SU). Die Detailansicht des Bodens ist in der Abbildung 24 dargestellt.

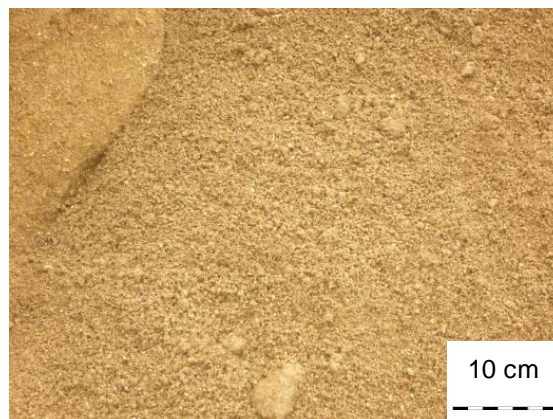


Abbildung 24: Detailansicht des **gemischtkörnigen Bodens** in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

Die Korngrößenverteilung zum **gemischtkörnigen Boden** ist in Abbildung 25 dargestellt.

Das Kornspektrum des **gemischtkörnigen Bodens** ist charakterisiert durch die Massenprozentanteile von 11% Schluff, 61% Sand und 28% Kies. Ableitend aus den einzelnen Prozentanteilen lässt sich der Boden gemäß Tabelle 13 klassifizieren.

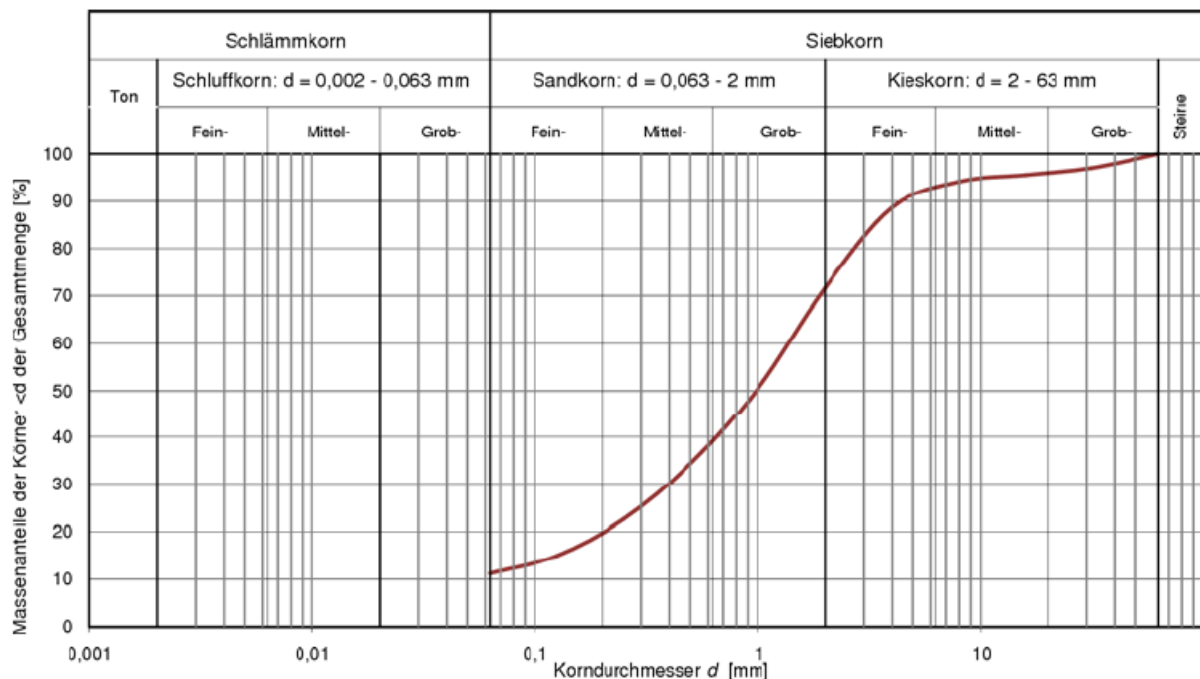


Abbildung 25: Körnungslinie des **gemischtkörnigen Bodens** in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

DIN 14688 [1997] charakterisiert das Bodenmaterial als weit gestuft (flach verlaufende Summenkurve).

Tabelle 13: Klassifizierung des **gemischtkörnigen Bodens** in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

Arbeitsgrundlage	Bodenart	Abkürzung
DIN 14688-2	fein kiesiger, leicht schluffiger Sand	fgrsi´Sa
DIN 18196	fein kiesiger, leicht schluffiger Sand	S, fg, u´
KA5*	mittel lehmiger Sand	SI3

* KA5 ... Bodenkundliche Kartieranleitung (5. Auflage)

Die Proctorversuche (gemäß DIN 18127 [1997]) ergaben eine Proctordichte von $1,985 \text{ g/cm}^3$ bei einem Wassergehalt von $w_{Pr} = 10,6\%$. Die charakteristischen Kenndaten aus dem Proctorversuch (Anlage 1-3) für den **gemischtkörnigen Boden** lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- 100% Proctordichte: $\rho_{Pr} = 1,985 \text{ g/cm}^3$; optimaler Wassergehalt $w_{Pr} = 10,6\%$
- 98% Proctordichte: $\rho_{Pr} = 1,945 \text{ g/cm}^3$; min./max. Wassergehalt $w = 7,9 / 13,5\%$
- 95% Proctordichte: $\rho_{Pr} = 1,886 \text{ g/cm}^3$; min./max. Wassergehalt $w = 3,7 / 15,3\%$
- 92% Proctordichte: $\rho_{Pr} = 1,826 \text{ g/cm}^3$; min./max. Wassergehalt $w = 2,0 / 16,9\%$.

Um die Wasserspannungen im **gemischtkörnigen Bodenmaterial** beschreiben zu können, wurde die bodenspezifische Kapillarspannungs-Sättigungs-Beziehung aufgenommen (Abbildung 26).

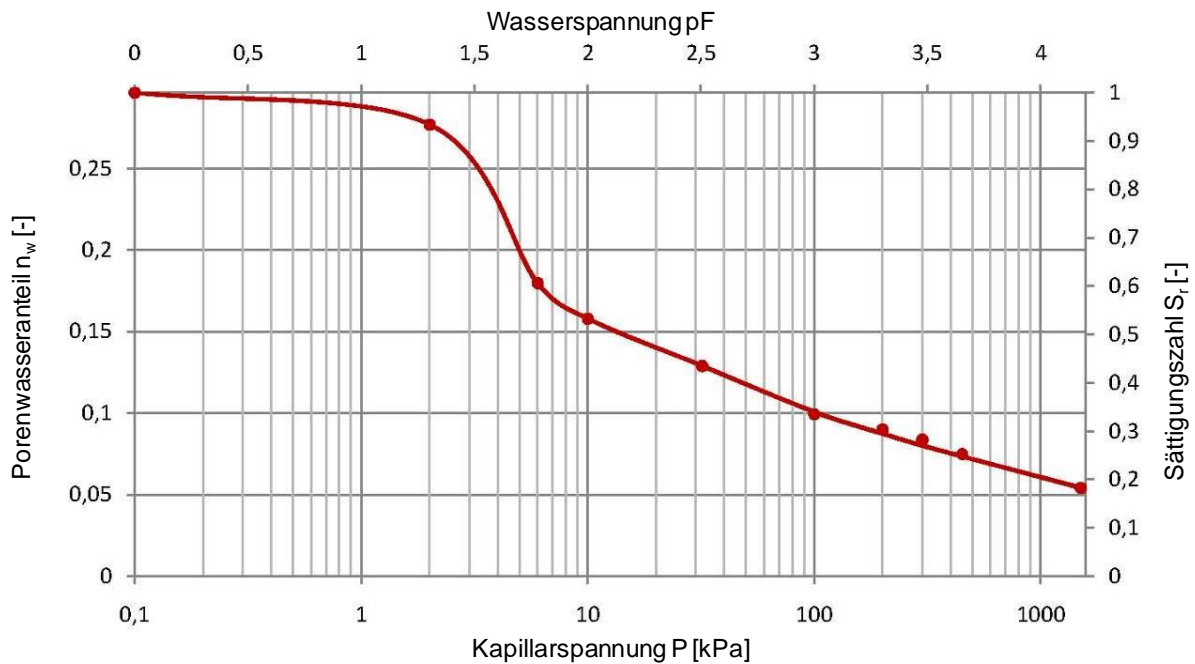


Abbildung 26: Kapillarspannungs-Sättigungs-Beziehung des **gemischtkörnigen Bodens** in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

Für den **gemischtkörnigen Boden** ergibt sich ein Wassergehalt bei Feldkapazität von 18 Vol.-%, beim permanenten Welkepunkt von 5 Vol.-% und bei nFK von 13 Vol.-%.

Fazit zur Bodenauswahl

Die im Rahmen der Eigenuntersuchungen gewonnen Ergebnisse belegen, dass die ausgewählten Böden als Rekultivierungsböden geeignet sind. Die Tabelle 14 fasst die Kennwerte bzgl. der untersuchten Parameter für die ausgewählten Böden der Lysimeterstation Bautzen/Nadelwitz zusammen.

Tabelle 14: Untersuchungsergebnisse ausgewählten Böden der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

Parameter	Oberboden	Unterboden	
		bindig	gemischtkörnig
natürlicher Wassergehalt w_n	18,1%	19,6%	8,1%
Korndichte ρ_s	2,162 g/cm ³	2,654 g/cm ³	2,692 g/cm ³
Proctordichte ρ_{Pr}	1,87 g/cm ³	1,797 g/cm ³	1,985 g/cm ³
Wassergehalt bei Proctordichte w_{Pr}	11,9%	16,2%	10,6%
Glühverlust V_{gl}	2,795	1,845	-
k_f -Wert	$9,4 \cdot 10^{-6}$ m/s	$3 \cdot 10^{-8}$ m/s	$9 \cdot 10^{-6}$ m/s
FK (experimentell)*	0,30	0,38	0,18
nFK (experimentell)*	0,23	0,23	0,13
PWP (experimentell)*	0,07	0,15	0,05
FK (nach KA5) [#]	0,39 / 0,32 / 0,28	0,39 / 0,32 / 0,28	0,34 / 0,27 / 0,25
nFK (nach KA5) [#]	0,27 / 0,23 / 0,21	0,27 / 0,23 / 0,21	0,22 / 0,18 / 0,17
PWP (nach KA5) [#]	0,12 / 0,09 / 0,07	0,12 / 0,09 / 0,07	0,12 / 0,09 / 0,08

- wurde nicht bestimmt; # für $1,2 < \rho_d < 1,4$ / $1,4 < \rho_d < 1,6$ / $1,6 < \rho_d < 1,8$ g/cm³; * DIN 11274 [1998]

Das Wasserrückhaltevermögen für die verwendeten Erdstoffe (Tabelle 14) weist analoge Werte zur Literatur sowie zur DIN 4220 (Tabelle 31 in DIN 4220 [2005]) auf [SCHOENHERR et al., 2005; BAUMERT et al., 2006; FABIAN & SÄNGER, 2006].

Der Grobporenanteil ($> 50 \mu\text{m}$) und somit die Höhe der Luftkapazität ist bei „neu hergestellten“, sekundärporenenarmen Rekultivierungsböden stark abhängig von der Bodenart und der Einbautechnik. Eine zu geringe Luftkapazität (LK) kann zu negativen Veränderungen des Redoxpotenzials und der Wasserleitfähigkeit führen [WITT & RAMKE, 2006]. Nach AG BODEN [2005] haben Böden bei 2 - 4 Vol.-% eine geringe, bei 4 - 12 Vol.-% eine mittlere und bei 12 - 20 Vol.-% eine hohe Luftkapazität. Die im Rahmen der Eigenuntersuchungen ermittelten Luftkapazitäten liegen für alle Böden im Bereich um 8 Vol.-%. Somit werden die Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) für den Bau von Wasserhaushaltsschichten ($\text{LK} \geq 8\%$) eingehalten [WITT & RAMKE, 2006; KONOLD et al., 2005]. Die ermittelten Werte entsprechen den Vorgaben gemäß DIN 4220, Tabelle 31 [2005].

3.4.5 Bodeneinbau

Im Rahmen der Eignungsuntersuchungen wurden Vorversuche im Labor sowie im Feld zur Festlegung der Einbauvorgaben durchgeführt. Da der Boden mit Vorverdichtung unter Einhaltung wasserhaushaltsspezifischer Anforderungen eingebaut werden sollte, sind die Festlegung der Einbauvorgaben und deren Einhaltung im Feld von großer Bedeutung. Es wurden Verdichtungsgrade von $D_{Pr} = 100\%$ und $D_{Pr} = 92\%$ ausgewählt. Diese resultieren aus konkreten Ausführungen in der Literatur [MELCHIOR et al., 2005; QUANDT & HENNEBERG, 2011]. Hiernach weisen locker geschüttete Rekultivierungsböden bereits nach ca. 1 bis 2 Jahren einen Verdichtungsgrad von etwa 90% auf.

Der Einfluss der Dichte des künstlich eingebauten Bodens auf die bodenmechanischen sowie bodenkundlichen Eigenschaften ist dabei von zentraler Bedeutung. Ziel muss es sein, dass die Setzungen und Sackungen vorweg genommen werden und somit negative Folgen wie Rissbildung, Schadverdichtung, Rutschungen, Verringerung der nutzbaren Feldkapazität usw. minimiert werden. Dabei spielt die Schaffung eines stabilen Bodengefüges eine zentrale Rolle.

Die unteren 0,4 m jeder Bodensäule (außer Lysimeter 8 und 10 bzw. Aufgrabungsfelder 8a und 10a) wurden mit einer Verdichtung von 100% eingebaut. Dies begründet sich mit Schutzaspekten tiefer liegender Schichten bzw. Wurzelsperreffekten [MELCHIOR et al., 2005]. Die Einbaukennwerte für die verwendeten Böden sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

Tabelle 15: Einbauparameter der Böden in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

Parameter	Oberboden	gemischtkörniger Boden		bindiger Boden	
Verdichtungsgrad $D_{Pr}^{\#}$ [%]	62	92	100	92	100
Trockendichte ρ_d [g/cm ³]	1,225	1,653	1,797	1,826	1,985
Wassergehalt $w^{\#}$ [%]	$\leq 8,5$	≤ 12	≤ 12	≈ 5	≈ 5
Porenzahl e [-]	0,519	0,606	0,477	0,474	0,356
Porenanteil n [-]	0,533	0,377	0,323	0,322	0,263
Wasserporenanteil n_w [-]	0,104	0,198	0,216	0,091	0,099
Sättigungsgrad S_R [-]	0,195	0,526	0,668	0,284	0,378
Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s]	$9,4 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-7}$

[#] Vorgabe für den Bodeneinbau in den Lysimetern

Der Einbau des Bodens in die Versuchsanlage erfolgte manuell in jeweils 0,1 m dicken Schichten. Um während des Einbaus die Einbauparameter einzuhalten, wurden die Dichte und der Wassergehalt ständig kontrolliert. So wurden vor dem Materialeinbau Wassergehaltsbestimmungen und exakte Einbaumassenberechnungen realisiert. In Tabelle 16 ist das Protokollieren des Bodeneinbaus am Beispiel Lysimeter 1 exemplarisch dargestellt.

Tabelle 16: Protokoll des Bodeneinbaus am Beispiel Lysimeter 1 der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

Schicht	Einbauhöhe [m]	Soll-Menge* (trocken) [kg]	Soll-Wassergehalt [-]	Ist-Menge (feucht) [kg]	Ist-Wassergehalt [-]	Volumen [m ³]
1	0,2	635	0,16	713	0,12	0,35
2	0,2	635	0,16	713	0,12	0,35
3	0,2	584	0,10	656	0,12	0,35
4	0,2	584	0,10	656	0,12	0,35
5	0,2	584	0,10	656	0,12	0,35
6	0,2	584	0,10	648	0,11	0,35
7	0,2	584	0,10	654	0,12	0,35
8	0,2	584	0,10	660	0,14	0,35
9	0,2	584	0,10	660	0,14	0,35
10	0,2	584	0,10	660	0,14	0,35
11	0,2	584	0,10	656	0,13	0,35
12	0,2	584	0,10	652	0,12	0,35
13	0,2	584	0,10	652	0,12	0,35
14	0,2	584	0,10	652	0,12	0,35
15	0,2	445	0,05	470	0,09	0,35

* alle Soll-Mengen beziehen sich auf die Trockendichte

Die Schrumpfgrenze w_s des bindigen Bodens ist ein entscheidender Einbauparameter. Der bindige Boden ist mit einem Wassergehalt von $w \leq w_s \approx 15\%$ einzubauen. Damit wird das Ziel verfolgt, spätere Schrumpfungseignisse und daraus resultierende Rissbildungen zu vermeiden. Dafür war es notwendig, das gesamte bindige Bodenmaterial zu homogenisieren. Der Boden wurde flächig ausgebreitet und mittels Bodenfräsen aufgearbeitet. Daraus resultieren zwei positive Effekte (gleichmäßiger Wassergehalt, Deagglomeration).

Bei dem gemischtkörnigen Boden waren derartige Maßnahmen aufgrund der Homogenität des Materials nicht notwendig.

Auf Basis einer einfachen Masse-Volumen-Beziehung wurde die erforderliche Bodenmasse pro 0,1-m-Einbauschicht unter Berücksichtigung des vorhandenen Wassergehalts rechnerisch ermittelt. Die notwendige Bodenmasse wurde über ein definiertes Gefäß (Schüttkübel) und mit Hilfe einer Wägung (Kraftmessdose Typ: Easy Force, Hersteller: AST GmbH Dresden, Fehler: $\pm 0,5$ kg) Vor-Ort ermittelt. Durch den Einsatz von Vibrationsstampfern (Typ: ES 65y/400, Hersteller: Wacker GmbH, München) und von mechanischen Handrammen wurden die definierten Schichten (Verdichtung) hergestellt. Zur Gewährleistung einer guten Verzahnung zwischen der eingebauten Schicht und der Folgeschicht wurde die Oberfläche jeder eingebauten Schicht mechanisch aufgeraut.

Abgesehen von den oben beschriebenen ständigen Eigenüberwachungen während des Einbaus wurden Verdichtungskontrollen an eingebauten Bodenschichten durchgeführt. Im bindigen Boden wurde anhand von Proben (Gewinnung aus Stützen) und Laboranalysen an der HTW Dresden der Verdichtungserfolg bewertet. Es sind maximale Abweichungen von lediglich bis zu 4% vom Sollwert zu attestieren. Die Verdichtungskontrollen beim Einbau des gemischtkörnigen Bodens erfolgten nach dem Densitometerverfahren (DIN 18125-2, [1999]).

3.4.6 Messtechnische Instrumentierung

Zentrales Element der Versuchsanlage ist die Messwarte (Abbildung 27 und Abbildung 28). Hier laufen alle Datenleitungen aus den Lysimetern zusammen. Mittels Datenloggersystem (Typ: ADL, Hersteller: Fa. Meier NT GmbH Zwönitz) werden alle einlaufenden Messdaten verarbeitet und gespeichert. Gleichfalls werden die Sickerwässer über die Sickerwasserleitungen nahezu verlustfrei in die Messwarte eingeleitet und mit Kippzählern (Typ: KZB-0,1I, Hersteller: Feinwerkmechanik Baloun Kemnitz, Fehler: $\pm 3\%$) quantifiziert. Die Messwarte (L/B/H: ca. 550/308/248) liegt vertieft, von drei Seiten hanglagig eingebettet im Zentrum der Lysimeterstation (Abbildung 10).



Abbildung 27: Messwarte der Lysimeteranlage
Bautzen/Nadelwitz



Abbildung 28: Messwarte mit Datenloggersystem
und Kippzähler

Der Messbetrieb bzw. die Datenerfassung in der Messstation erfolgt ganzjährig, wobei im Minimum einmal monatlich die Datenauslesung erfolgt.

Zur Durchführung einer Wasserhaushaltsbilanzierung ist neben der Erfassung der Abflussmengen der Testfelder zusätzlich die Erhebung meteorologischer Daten notwendig. Die wichtigsten klimatologischen Parameter (z. B. Niederschlag, Temperatur) wurden ortsnah zur Lysimeteranlage an einer Klimastation (Typ: UNIKLIMA 7, Hersteller: TOSS GmbH, Potsdam; Abbildung 30) auf dem Gelände der Deponie Bautzen/Nadelwitz gemessen. Zusätzlich wurde der Niederschlag ebenerdig direkt neben den Lysimetern erfasst (Abbildung 29).



Abbildung 29: Niederschlagsmesser an der
Lysimeteranlage
Bautzen/Nadelwitz



Abbildung 30: Klimastation auf der Deponie
Bautzen/Nadelwitz

Der Niederschlagsmengenaufnehmer verfügt über eine Heizung (24 V; 70 W). Dies erlaubt teilweise eine Erfassung von Schneeniederschlägen. Die Niederschlagserfassung erfolgt über eine integrierte Kippwaage. Das Messprinzip ist Stand der Technik und in »Guide to Meteorological Instruments No 8« der World Meteorological Organization (WMO) beschrieben und diskutiert [WMO, 2008]. Da die Niederschlagsmesseinrichtung an der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz ebenerdig bzw. bodengleich errichtet wurde, kann eine Korrektur der gewonnenen Niederschlagsdaten vernachlässigt werden [RICHTER, 1995].

Die Rundlysimeter sind mit wasserhaushaltsrelevanter Messtechnik bestückt. Einen Überblick über die messtechnische Ausrüstung der Rundlysimeter gibt Tabelle 17 wieder.

Tabelle 17: Messtechnische Bestückung der Lysimeter in der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

Lysimeter	Messebenen [m Bodensäule]			
	für volumetr. Wassergehalt ^{##}	für Saugspannung / Matrixpotential	für Setzungen	für Bodentemperatur
Rundlysimeter 1	0 - 3,0	-	0,2-1,0-1,8-2,6	0,15-0,3-1,0-3,0
Rundlysimeter 2	0 - 2,0	-	0,2-1,0-1,6	-
Rundlysimeter 3 [#]	0 - 2,0	0,2-0,5-1,0-1,6	0,2-1,0-1,6	-
Rundlysimeter 4	0 - 1,0	0,6	0,2-0,6	-
Rundlysimeter 5 [#]	0 - 2,0	0,2-0,5-1,0-1,6	0,2-1,0-1,6	-
Rundlysimeter 6	0 - 2,0	-	0,2-1,0-1,6	-
Rundlysimeter 7	0 - 1,0	0,45-0,75	0,2-0,6	-
Rundlysimeter 8	0 - 1,6	1,55	0,2-0,8-1,8	-
Rundlysimeter 9	0 - 3,0	-	0,2-1,0-1,8-2,6	0,15-0,3-1,0-3,0
Rundlysimeter 10	0 - 1,6	1,55	0,2-0,9	-
Aufgrabungsfeld 1a	0 - 3,0	-	-	-
Aufgrabungsfeld 3a [#]	0 - 2,0	-	-	-
Aufgrabungsfeld 5a [#]	0 - 2,0	-	-	-
Aufgrabungsfeld 8a	0 - 1,6	-	-	-
Aufgrabungsfeld 9a	0 - 3,0	-	-	-
Aufgrabungsfeld 10a	0 - 1,6	-	-	-

[#] Lysimeter/Feld mit Berechnungseinheit

^{##} Messung durchgängig im Abstand von 0,1 m

Automatisch erfasst werden die Bodenfeuchtegehalte je Messebene, die Saugspannung je Messebene und die Bodentemperatur. Die auftretenden Setzungserscheinungen werden manuell mittels Messschieber gemessen. Die eingebaute Messtechnik wurde versuchsspezifisch angepasst und modifiziert, um dadurch eine bestmögliche Messung zu ermöglichen. Detaillierte Ausführungen zu der Messtechnik und dem Messprinzipien sind in SCHOENHERR et al. [2011] beschrieben.

Zur Erfassung der Setzungen ist in jedem Lysimeter ein Mehrfachextensometer (Typ: Extenso, Hersteller: Feinwerkmechanik Baloun Kernitz, Fehler: $\pm 0,1$ mm; Abbildung 31) eingebaut. Die auftretenden Setzungen werden hierbei auf eine Lochscheibe, die mit einem Stahlrohr verbunden ist, übertragen (Abbildung 32). Im Verhältnis zu einem Festpunkt sind die Setzungsdifferenzen zu erfassen. Diese werden manuell mit einem digitalen Messschieber (Typ: Mitutoyo digimatic, Fehler: 0,05 mm, Hersteller: Mitutoyo Europe GmbH, Neuss) aufgenommen.



Abbildung 31: Einbau des Extensometers in die Rundlysimeter der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

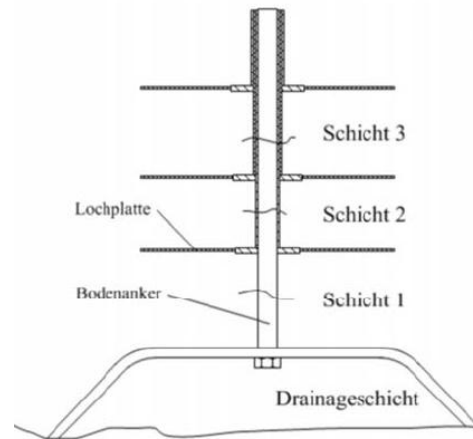


Abbildung 32: Seitenansicht des eingebauten Extensometers [FREUDENREICH, 2007]

Zur Erfassung der Bodenfeuchte kommen in den Lysimetern PR2-Profilsonden (Typ: PR2/6, Hersteller: Fa. Delta-T Cambridge, Fehler: $\pm 6\%$) zum Einsatz. Die Messungen der Bodenfeuchte basieren auf dem FDR-Messprinzip (Frequency Domain Reflectometry). Die Datengewinnung erfolgt kontinuierlich (10 Minuten-Rhythmus) und diskontinuierlich per Handmessung. Hierzu wird eine Bodenfeuchtesonde (PR2) in die entsprechend eingebauten Hüllrohre eingelassen und mittels Handauslesegerät HH2 ausgelesen. Über das Datenloggersystem werden die Profilsonden abgefragt und auf dem Loggersystem gespeichert.

Das Matrixpotential wird mit Hilfe von Tensiometern (Typ: T8, Hersteller: UMS GmbH München, Fehler: ± 5 hPa) und Equitensiometern (Typ: EQ15, Hersteller: Ecomatic GmbH Dachau, Fehler: $\pm 10\%$) bestimmt. Die Equitensiometer vom Typ EQ15 sind in den oberen Bereichen der Bodensäule eingebaut. Dadurch sind Saugspannungsbereiche bis -1.500 kPa (Bereich des PWP) messbar.

Oberhalb der stark verdichteten Bodenschicht ($D_{Pr} = 100\%$) ist in den Lysimetern 3, 4 und 5 sowie oberhalb der Entwässerungsschicht in den Lysimetern 8 und 10 ein T8-Tensiometer (Hersteller: UMS GmbH München, Fehler: ± 5 hPa) eingebaut. Ziel dieser Messungen ist die Überwachung möglicher Staunässe. Die T8-Daten werden kontinuierlich erfasst und vom Loggersystem gespeichert.

Die Bodentemperatur wird über Widerstandsthermometer (Typ: Pt1000, Hersteller: UP GmbH Cottbus, Fehler: $\pm 0,2$ K) in den 3 m tiefen Rundlysimetern gemessen. Hierbei werden hauptsächlich die Bereiche eines möglichen Frosteinflusses (bis ca. 1,0 m) messtechnisch erfasst.

Das Sickerwasser aus den Bodenschichten in den Rundlysimetern wird über das Drainagematerial gefasst und über Sickerwasserrohre in die Messwarte geleitet. Ein dazwischen geschalteter Siphon bewirkt eine strömungsmechanische Entkoppelung des

Kippzählers (Typ: KZB-0,1I, Hersteller: Feinwerkmechanik Baloun Kemnitz, Fehler: $\pm 3\%$) von der Sickerwasserfassung. Dadurch ist ein saug- sowie staufreier Eintrag des Wassers in die Kippzählereinheit gewährleistet. Die Messwerterfassung erfolgt kontinuierlich und automatisch. Das eingesetzte Messsystem erlaubt eine hohe zeitliche Auflösung (z. B. stündlich) und hat einen vernachlässigbar kleinen Messfehler von $\pm 3\%$ bei 100 ml.

3.4.7 Vegetation/Bewuchs

Nach dem Abschluss der Arbeiten zur Geländeprofilierung wurden im Juni 2007 sowohl alle Lysimeter und Aufgrabungsfelder sowie das direkt angrenzende Geländeumfeld mit einer üblichen Gras- / Kräutersaatgutmischung eingesät (Tabelle 18).

Tabelle 18: Zusammensetzung der aufgetragenen Vegetation auf dem Gelände der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

Vegetation	Anteil am Saatgemisch
Deutsches Weidelgras (<i>Lolium perenne</i> MARITIM)	30%
Deutsches Weidelgras (<i>Lolium perenne</i> EDDA)	40%
Rotschwingel (<i>Festuca rubra rubra</i> SHADEWA)	30%

Die Vegetation in Tabelle 18 spiegelt bevorzugte Arten zur Rekultivierung wieder [OLSCHEWSKI et al., 2001; TAUCHNITZ, 2007]. Die Ergebnisse der Untersuchungen von WATTENDORF und SOKOLLEK [2000] verdeutlichen, dass unter günstigen Bedingungen derartige Gras- / Kräutermischungen innerhalb von 2 - 3 Vegetationsperioden hohe Bedeckungsgrade ausbilden. Dadurch kann bereits nach relativ kurzer Zeit eine maximale Verdunstung erreicht werden. Weitere Vegetationsformen (z. B. Strauch- und Baumbestände) sind aufgrund der Lysimeterdimensionen nicht möglich.

4 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

Im Folgenden sind alle experimentellen Untersuchungen zur Bodenmechanik, zum Wasserhaushalt und zur Vegetationsentwicklung detailliert vorgestellt und analysiert.

4.1 Bodenmechanik

Die auf Basis der Eignungsuntersuchungen festgelegten Einbaukennwerte konnten mit der eingesetzten Einbautechnik qualitätsgerecht erreicht werden. Durch den Verdichtungsgrad von $D_{Pr} \approx 90 - 92\%$ können Setzungserscheinungen und die daraus resultierenden entsprechenden Änderungen der Porenverhältnisse bzw. des Wasserrückhaltevermögens auf ein Minimum reduziert werden. Bisher waren lediglich geringfügige wetterabhängige Setzungs- und Hebungerscheinungen im Oberbodenbereich bis zu einer Tiefe von 0,2 m

festzustellen. Diese haben jedoch keine Auswirkungen auf die Funktionalität des Systems „Wasserhaushaltsschicht“. Die Aufgrabungsuntersuchungen bestätigen den qualitätsgerechten Einbau. Es sind keine wasserstauenden Schichten nachweisbar.

Der Einbau des bindigen Bodenmaterials unterhalb der Schrumpfgrenze ist besonders vorteilhaft, weil dadurch spätere Schrumpfrisse vermieden werden können. Schrumpfrisse stellen Wasserwegsamkeiten dar, die sich stetig erweitern, vergrößern und dadurch bevorzugte Sickerwasserleitbahnen darstellen [WITT & ZEH, 2004].

Es hat sich gezeigt, dass spezifische Einbaukennwerte (Wassergehalt, Verdichtung) nur sehr schwer kontinuierlich im Rahmen des Bodeneinbaus einzuhalten sind. Geringfügige Abweichungen sind trotz qualitätsgerechten Bodeneinbaus nicht vollständig zu vermeiden. Es ist sinnvoll, wenn die Einbaukennwerte in spezifischen Schwankungsbreiten ausgewiesen werden. Der methodische Ansatz des Dreiecks der Phasenzusammensetzung nach RUDERT [1977] stellt dafür eine geeignete Basis dar [AL-AKEL et al., 2007].

4.1.1 Setzungsmessungen

Eine starke Verformung (Setzung) führt zu Veränderungen der nFK und der LK und kann die Funktionalität der Wasserhaushaltsschicht nachteilig beeinflussen.

Zur Beurteilung des Setzungs- und Verformungsverhaltens der eingebauten Schichten wurden deshalb die vertikalen Verformungen in allen Lysimetern mittels Extensometer gemessen. Die gemessenen Setzungen sind geringfügig und demzufolge vernachlässigbar.

Die maximalen Setzungen wurden im ersten Meter mit 4,84 cm am 11.08.09 wegen anhaltender Trockenheit gemessen. Die maximale Hebung (Frosthebung) trat mit 3,55 cm am 07.01.08 auf. Die weiteren Ebenen zeigten kaum Änderungen. Die gemessenen Setzungen bzw. Hebungen waren witterungsbedingt und traten nur kurzzeitig auf. Der gemischtkörnige Boden reagierte geringfügiger auf Witterungseinflüsse.

Im Lysimeter 9 betrug die maximale Setzung 2,55 cm und die maximale Hebung 0,26 cm. Setzungen und Hebungen in den Lysimetern der Station Bautzen/Nadelwitz beeinflussen die nFK nur unwesentlich.

4.1.2 Aufgrabungsuntersuchungen

Die Aufgrabungen erfolgten in regelmäßigen Abständen zu Beginn und am Ende des hydrologischen Sommerhalbjahres (April / Mai und Oktober / November). Die erste Aufgrabung fand im Oktober 2007 und die letzte Aufgrabung im Auswertungszeitraum (11/2007 - 04/2010) dieser Arbeit am 08.04.2010 statt.

Dabei wurden die Aufgrabungsfelder jeweils bis zur Basis durchörtert. Für den ersten Bodenmeter erfolgten die Sondierungen mit einem Sondendurchmesser von 80 mm, im zweiten Bodenmeter von 60 mm und im dritten Bodenmeter von 40 mm.

Zur Bestimmung des Feuchteprofils des Rekultivierungsbodens wurden über die gesamte Tiefe Proben zur Wassergehaltsbestimmung gewonnen.

Das Arbeitsprogramm der Aufgrabungsuntersuchungen ist in Tabelle 19 zusammengefasst.

Tabelle 19: Untersuchungsprogramm zu den Aufgrabungen an der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

Tätigkeit/Parameter	Norm	Boden	
		bindig	gemischtkörnig
Rammkernsondierung	DIN 4021	✓	✓
Dichtebestimmung aus Stutzen	DIN 4021	✓	-
Dichtebestimmung mit Densitometer	DIN 18125 T2	-	✓
Wassergehaltsbestimmung	DIN 18121	✓	✓

Exemplarisch für die Aufgrabungsfelder 1a (3 m, bindiger Boden) und 9a (3 m, gemischtkörniger Boden) sind die Ergebnisse aller Aufgrabungen in Abbildung 33 dargestellt.

Die Abbildung 33 verdeutlicht die Auffüllung des Porenraums im Boden durch Niederschläge nach dessen Einbau in die Lysimeter. Im Rahmen der ersten Aufgrabung (10/2007) wurden noch Wassergehalte ermittelt, die im Bereich des Einbauwassergehaltes lagen. Vor allem das bindige Bodenmaterial (Abbildung 33, links) zeigt deutliche Schwankungen des Bodenwassergehaltes in den hydrologischen Halbjahren.

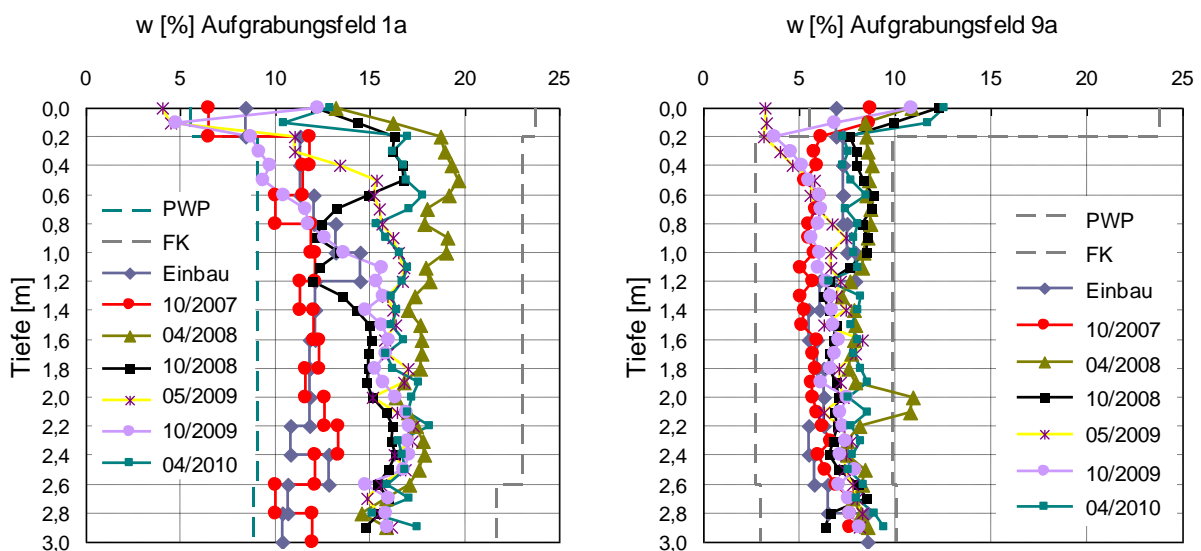


Abbildung 33: Wassergehalte in den einzelnen Probenahmetiefen zu unterschiedlichen Zeitpunkten an den Aufgrabungsfeldern 1a (bindiger Boden, links) und 9a (gemischtkörniger Boden, rechts) von 10/2007 – 04/2010

Ab einer Tiefe von ca. 1,2 m u. GOK für den bindigen Boden (Abbildung 33, links) bzw. ca. 1,0 m u. GOK für den gemischtkörniger Boden (Abbildung 33, rechts) verlaufen die Bodenfeuchten unabhängig vom Untersuchungszeitraum jeweils auf einem Feuchteniveau. Deutlich sind die Sprünge des Bodenwassergehaltes zwischen Oberboden und Unterboden.

Die Wassergehaltsbestimmung im Mai 2009 verdeutlicht die verstärkte Wasserzehrung durch die Vegetation. Beim gemischtkörnigen Bodenmaterial im Aufgrabungsfeld 9a (Abbildung 33, rechts) liegen die Bodenwassergehalte des Oberbodens in beiden jährlichen Aufgrabungskampagnen oberhalb des Wassergehaltes im Unterboden.

Beim Vergleich der bodenartenabhängigen Wassergehaltsverläufe über die Profiltiefen (Abbildung 34) aus den Untersuchungen der 4. Aufgrabung (07.05.2009) wird deutlich, dass in den Lysimetern mit gleicher Bodenart die Wassergehalte unabhängig von der Profiltiefe sehr ähnlich verlaufen.

Bei den bindigen Böden liegen die Bodenwassergehalte ab ca. 0,5 m u. GOK im Bereich 15 - 20%. Der Oberboden sowie der Bereich zwischen 0,2 und 0,5 m u. GOK zeigen eine deutliche Abnahme des Wassergehalts mit zunehmender Tiefe.

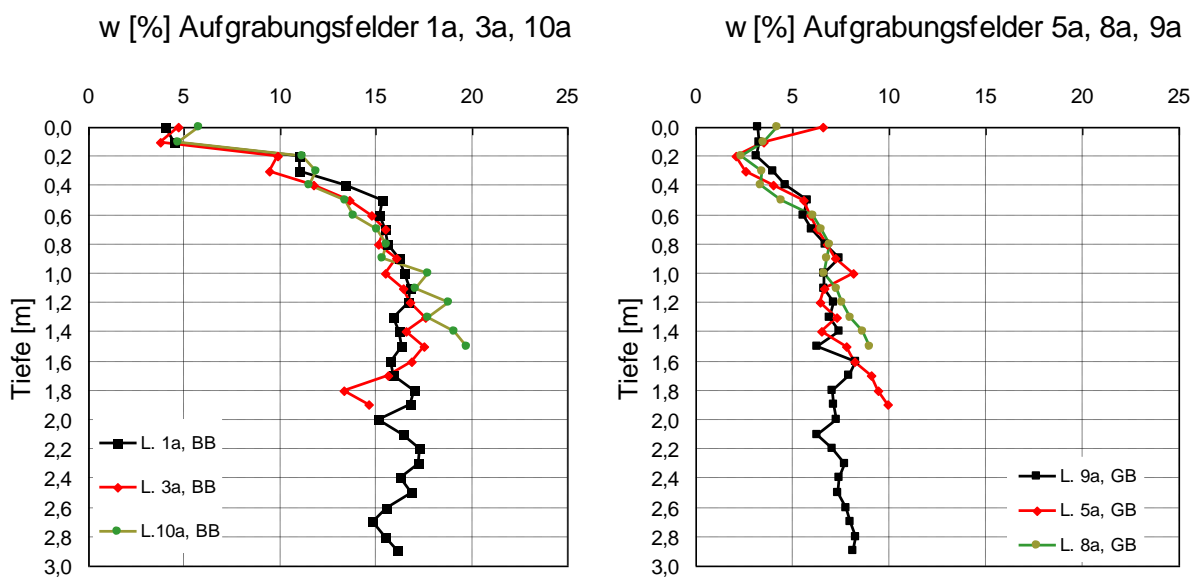


Abbildung 34: Wassergehaltsbestimmungen in den Aufgrabungsfeldern 1a, 3a, und 10a (bindiger Boden (BB); links) und in den Aufgrabungsfeldern 5a, 8a, und 9a (gemischtkörniger Boden (GB); rechts) aus der 4. Aufgrabung (05/2009)

Der Wassergehalt im gemischtkörnigen Boden verläuft ab 0,5 m u. GOK konstant in einem Niveau von 6 - 10%. Aufgrund des Bodenartenwechsels zwischen Ober- und Unterboden nehmen die Wassergehalte unterhalb von 0,2 m u. GOK zunächst ab (< 5%).

Die Aufgrabungsergebnisse verdeutlichen, dass die Böden qualitätsgerecht eingebaut wurden. Es sind keine signifikant stauenden Schichten nachweisbar.

4.2 Wasserhaushalt

Der Wasserhaushalt der eingebauten Böden wird, unabhängig von der Vegetation und den atmosphärischen Einflüssen, primär durch die wasserhaushaltsrelevanten Variablen:

- Bodenwassergehalt bzw. Bodenfeuchte,
- Saugspannung und
- Sickerwasserabfluss

beeinflusst.

Seit dem Beginn des hydrologischen Jahres 2008 (11/2007) werden die Messdaten erfasst, aufbereitet und ausgewertet. Bei allen Auswertungen und Interpretationen muss beachtet werden, dass die eingebauten Böden bzw. Bodensysteme sich zum Teil immer noch in einer „Einschwingphase“ befinden, die bis zu 5 Jahre dauern kann [OLBRISCH, 1975; DVWK, 1996; MÜLLER et al, 2009b].

4.2.1 Bodenfeuchte

Der Verlauf der Bodenfeuchte über das Bodenprofil spielt eine große Rolle bei der Bewertung der Funktionalität von Wasserhaushaltsschichten.

Im Folgenden sind die Bodenfeuchteverläufe exemplarisch für Lysimeter 1 (3 m, bindiger Boden) und Lysimeter 9 (3 m, gemischtkörniger Boden) dargestellt. In den Lysimetern 1 (3 m, bindiger Boden), 3 (2 m, bindiger Boden, Beregnung), 5 (2 m, gemischtkörniger Boden, Beregnung) und 9 (3 m, gemischtkörniger Boden) wird die Bodenfeuchte in unterschiedlichen Tiefen des Bodenprofils kontinuierlich erfasst. Die Bodenfeuchteverläufe weiterer Lysimeter sind detailliert in SCHOENHERR et al. [2011] beschrieben.

In Abbildung 35 und Abbildung 36 sind die Tageswerte der Bodenfeuchte und des Niederschlags für das Lysimeter 1 grafisch dargestellt.

Der Bodenfeuchteverlauf im ersten Meter der Bodensäule wird durch die Einflüsse von Niederschlag und Vegetation geprägt. Am stärksten reagiert der Oberboden (0,0 - 0,2 m u. GOK). Die Bodenfeuchten schwanken zwischen 5 und 30 Vol.-%, was auf die starke Durchwurzelung (hoher Wasserentzug) sowie die schnelle Befeuchtung bei Niederschlagsereignissen zurückzuführen ist.

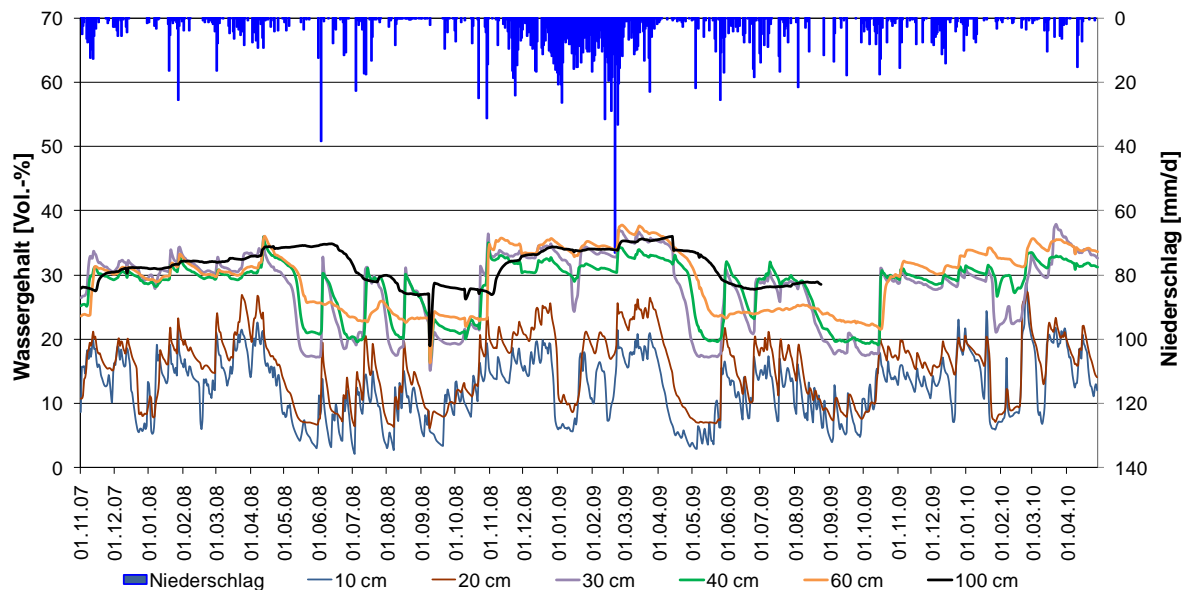


Abbildung 35: Bodenfeuchteverlauf im Lysimeter 1 (3 m, bindiger Boden) in der Tiefe von 0 - 1,0 m u. GOK

Die ersten signifikanten Reaktionen im Bereich 0,3 - 0,4 m u. GOK treten ab dem Frühjahr 2008 auf. Der Wassergehalt nimmt zeitverzögert mit der Tiefe deutlich ab und schwankt in den Sommermonaten stark. Im hydrologischen Winterhalbjahr 2009 sind relativ gleichbleibende Wassergehalte im Bereich 0,3 - 1,0 m u. GOK festzustellen. Durch die geringere Verdunstung im hydrologischen Winterhalbjahr wird der Bodenwasserspeicher aufgefüllt. Die Wassergehalte schwanken im Bereich 15 bis 40 Vol.-%.

Aufgrund von unplausiblen Messwerten sowie Datenausfällen ist der Bereich 1 - 2 m u. GOK nicht berücksichtigt.

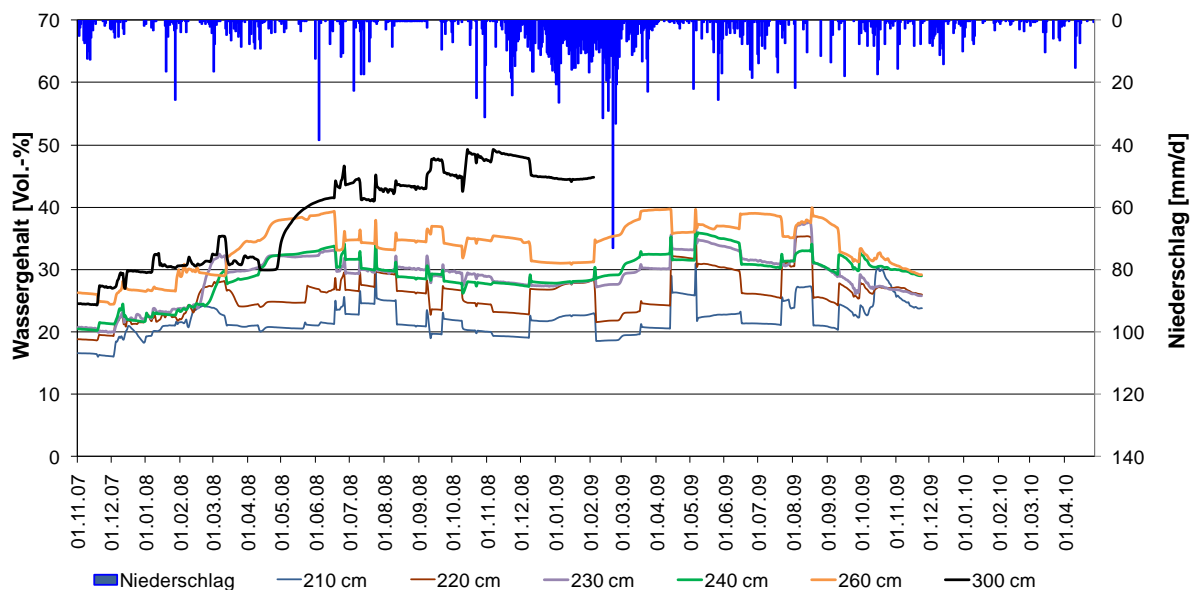


Abbildung 36: Bodenfeuchteverlauf im Lysimeter 1 (3 m, bindiger Boden) in der Tiefe von 2,0 - 3,0 m u. GOK

Die Auswertung des Bereichs von 2,0 - 3,0 m u. GOK im Lysimeter 1 kann für die Messebene „3,0 m“ nur bis 01/2009 und für die übrigen Messebenen bis 11/2009 erfolgen. Die Messsonde (3 m) fiel ab 12/2009 aus. Ab den II. Quartal des Kalenderjahres 2008 liegen keine plausiblen Messwerte vor. Der Wassergehalt liegt permanent über dem Wassergehalt bei FK.

Die vorhandenen Daten zeigen nahezu parallel verlaufende Wassergehalte auf. Die Bodenfeuchte schwankt zwischen ca. 20 und 40 Vol.-%. Deutlich wird, dass erstmalig im II. Quartal des Kalenderjahres 2008 eine Feuchtefront bis in die untersten Bodenbereiche vordrang, was auf die Infiltration von Schneeschmelzwasser und die Niederschläge aus dem I. Quartal des Kalenderjahres 2008 zurückzuführen ist.

Der Verlauf der Bodenfeuchte im Bereich 2,0 - 2,6 m u. GOK zeigt eine zeitlich versetzte Reaktion auf die Niederschlagsereignisse. Die Schwankungen der Bodenfeuchte innerhalb des Bodens resultieren aus dem sich stetig ändernden Wasserpotenzialgradienten innerhalb der Bodensäule [POTT & HÜPPE, 2007].

Da die max. Durchwurzelungstiefe bei ca. 1,5 m u. GOK liegt, sind keine signifikanten Wasserverbräuche aus tiefer liegenden Bodenbereichen mehr möglich. Sämtlicher Wassernachschub aus dem oberen Bodenbereich führt zu einer Auffüllung des Bodenwasserspeichers in den tieferen Ebenen und demzufolge bei Überschreitung des Wassergehalts bei FK zu einer Versickerung.

Abbildung 37, Abbildung 38 und Abbildung 39 verdeutlichen den Verlauf der Bodenfeuchte im Lysimeter 9 (3 m, gemischtkörniges Bodenmaterial).

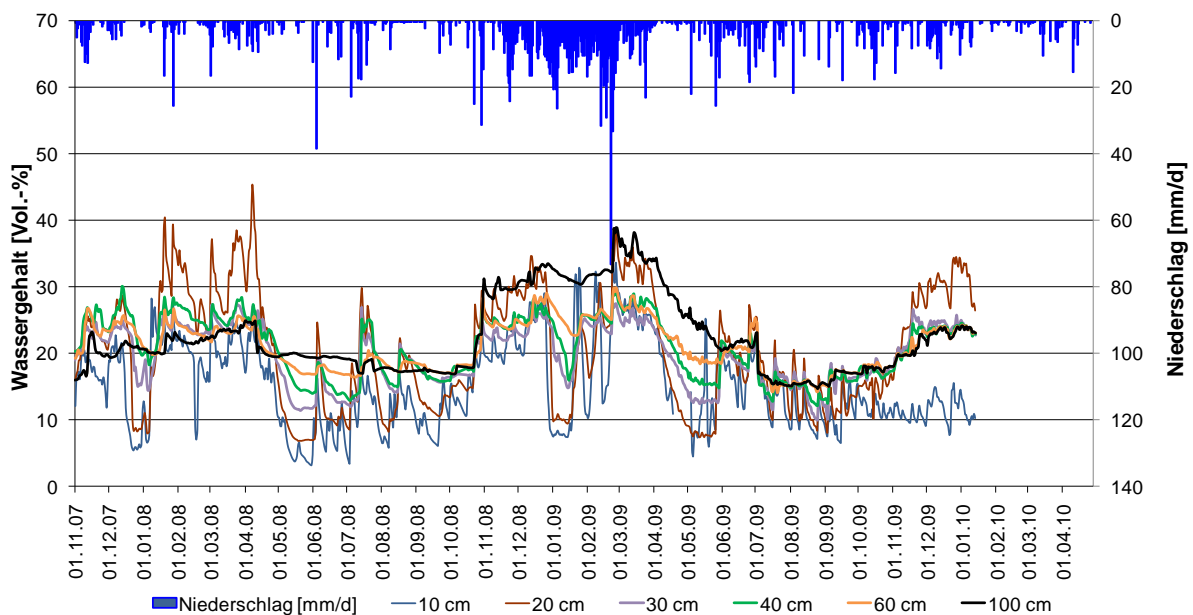


Abbildung 37: Bodenfeuchteverlauf im Lysimeter 9 (3 m, gemischtkörniger Boden) im Bereich 0 - 1,0 m u. GOK

Der charakteristische Verlauf im Bereich von 0 - 1,0 m u. GOK (Abbildung 37) ist vergleichbar zum Verlauf in Lysimeter 1. Der Boden zeigt die deutlichsten und zeitlich direktesten Reaktionen auf Niederschlagsereignisse (Abbildung 37). In den Sommermonaten fallen die Wassergehalte im Oberboden teilweise unter 10 Vol.-%, was mit der Evapotranspiration der Vegetation zu begründen ist. Jeweils in der 2. Hälfte der hydrologischen Winterhalbjahre liegen die Wassergehalte aufgrund der Niederschläge und der ansteigenden Temperaturen (Schneesmelze, Auftauen des Bodens), teilweise im Bereich der FK.

Rückgänge der Bodenfeuchte in den oberen Bodenbereichen während einiger Winterperioden (z. B. erste Januarhälfte 2009) sind durch gefrierenden Boden verursacht. Unter diesen Bedingungen funktioniert das Messprinzip der PR2-Sonden zur Bodenfeuchtemessung nicht mehr.

Die durchschnittlichen Wassergehalte in den Lysimetern mit gemischtkörnigem Bodenmaterial lassen vermuten, dass der im Labor ermittelte Wassergehalt bei Feldkapazität etwas zu gering, gegenüber den im Feld gemessenen Werten ist. Die elektronischen Feldmessungen zeigen Wassergehalte (vor allem im hydrologischen Winterhalbjahr) von mehr als 25 Vol.-%. Die Wassergehaltsbestimmungen aus den Proben der Aufgrabungsuntersuchungen sowie der pF-Kurve (Abbildung 26) liegen um ca. 20 Vol.-%.

Das gemischtkörnige Unterbodenmaterial zeigt einen gleichartigen Verlauf innerhalb der Messebenen und im Vergleich zum Oberboden. Aufgrund der geringeren FK gegenüber Lysimeter 1 liegen die Bodenfeuchten maximal bei ca. 30 Vol.-%. Die deutlich höhere Durchlässigkeit des gemischtkörnigen Bodens und das geringere Wasserrückhaltevermögen bedingen ein zeitnahes Versickern der infiltrierten Niederschlagsmengen in tiefere Bodenbereiche.

Im Bodenbereich 1,0 - 2,0 m u. GOK (Abbildung 38) wird jahreszeitlich unabhängig ein Wassergehalt von durchschnittlich ca. 25 Vol.-% gemessen, was im Bereich der FK liegt. Der Bodenwasserspeicher ist nahezu ganzjährig gefüllt und wird aufgrund des Porenregimes sowie der geringeren Durchwurzelung kaum in Richtung Atmosphäre entleert. Eine leichte Bodenfeuchteabnahme erfolgt während der Vegetationsperiode (Mai - Oktober). An den kurzzeitigen Starkniederschlagseinflüssen (z. B. Ende 02/2009) ist der Durchgang einer Feuchtefront zu erkennen.

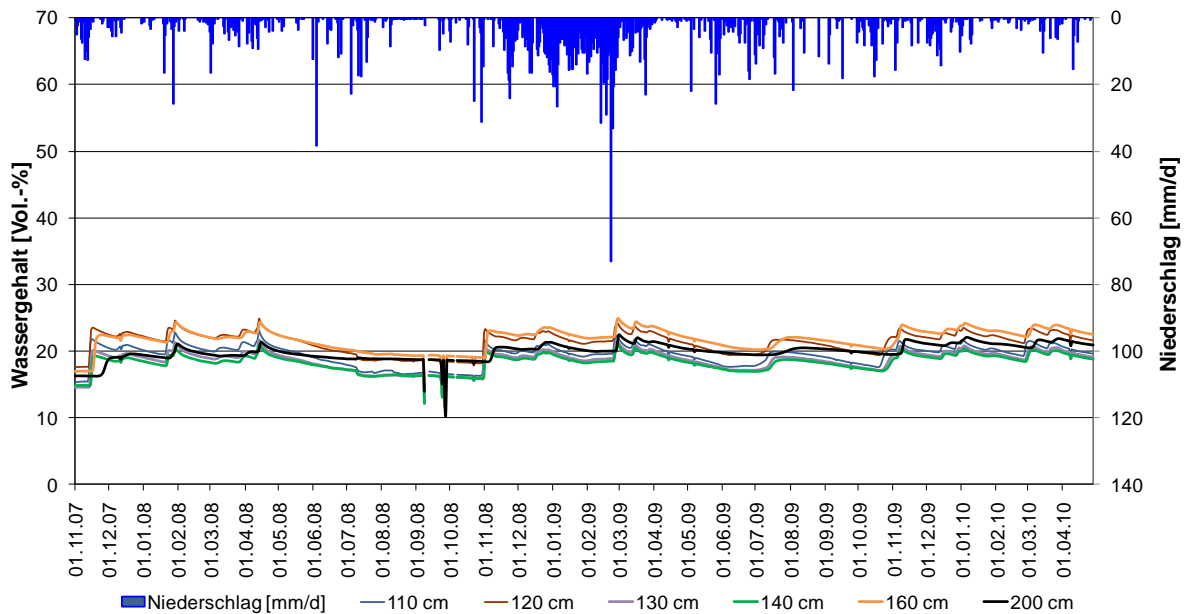


Abbildung 38: Bodenfeuchteverlauf im Lysimeter 9 (3 m, gemischtkörniger Boden) im Bereich 1,0 - 2,0 m u. GOK

Die Wassergehalte ab 2,0 m u. GOK (Abbildung 39) unterliegen kaum Schwankungen. Deutliche Reaktionen auf den Niederschlag sind nicht mehr vorhanden.

Das hydrologische Sommerhalbjahr ist aufgrund der geringeren Durchwurzelungstiefe als im bindigen Boden durch eine relative Konstanz der Bodenfeuchte (unterhalb von 2,0 m) gekennzeichnet.

In den hydrologischen Winterhalbjahren übersteigen die Wassergehalte teilweise die FK. Der Bodenwasserspeicher ist voll und weitere Infiltrationen bewirken entsprechende hydraulische Reaktionen (Versickerung).

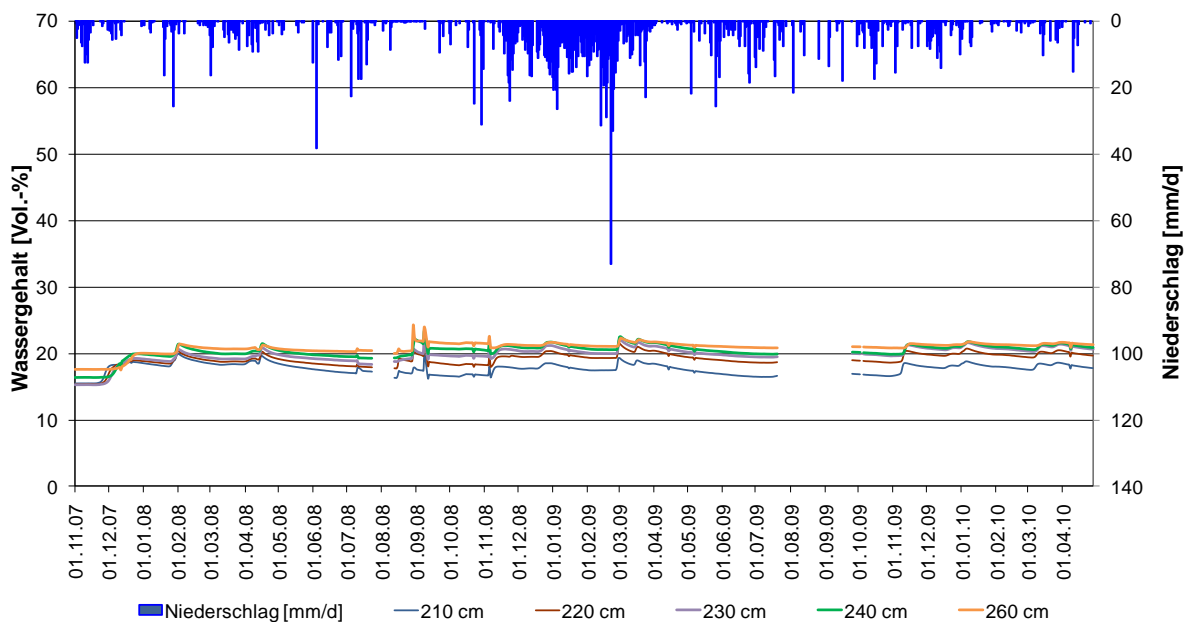


Abbildung 39: Bodenfeuchteverlauf im Lysimeter 9 (3 m, gemischtkörniger Boden) im Bereich 2,0 - 3,0 m u. GOK

Die Datenreihe der Bodenfeuchtemessung beinhaltet Datenverluste für alle Messebenen. Im Zeitraum 23.07.-15.08.2008 und 20.07.-29.09.2009 liegen keine Messwerte vor. Die Messebene „3,0 m“ ist im vorhandenen Zeitraum komplett ausgefallen.

Die Untersuchungen an den Lysimetern der Lysimeterstation Bautzen/Nadelwitz verdeutlichen, dass je nach Art und Mächtigkeit des Rekultivierungsbodens, der Durchwurzelungstiefe sowie der Niederschlagsmenge und -intensität die Wasserhaushaltsschichten eine verzögerte Reaktion auf die Witterungseinflüsse zeigen. Der Wasserentzug aus dem Bodenwasserspeichervolumen ist primär begrenzt auf den durchwurzelten Bodenraum in den Lysimetern.

Je nach Vegetations- und Bodenentwicklung unterliegt der Bodenwasserhaushalt in den Lysimetern einer Dynamik. Die Untersuchungsergebnisse verdeutlichen, dass vor allem in der 2. Hälfte des jeweiligen hydrologischen Winterhalbjahres (u. a. aufgrund der Schneeschmelze und durch Auftaueffekte) die Wahrscheinlichkeit am größten ist, dass Sickerwässer aus der Wasserhaushaltsschicht in Richtung Deponiekörper austreten. Die Untersuchungen von MELCHIOR et al. [2010] bestätigen derartige Beobachtungen für Wasserhaushaltsschichten.

Je nach Bodencharakteristik des Unterbodens, gibt es differenzierte Verläufe der Bodenwassergehalte über die Profiltiefe. Alle untersuchten Wasserhaushaltsschichten zeigen im ersten Bodenmeter die deutlichsten Wassergehaltsänderungen. Durch die Wasserentnahme während der Vegetationsperiode verringern sich die Wassergehalte im Boden und die Saugspannungen steigen. In den obersten Bodenbereichen dominiert eine Aufwärtsbewegungen des Wassers (Porenwasser) entgegen der Schwerkraft. Ursache sind die Saugspannungsdifferenzen, die einen kapillaren Aufstieg des Porenwassers bewirken [SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002; HÖLTING & COLDEWEY, 2005].

Je nach FK des Bodens verzögern sich die Sickerwasserereignisse. Unterhalb der Durchwurzelungszone bildet sich eine Wasserscheide (Abbildung 40) aus.

Zur grafischen Ermittlung der Wasserscheide wurden die Bodenfeuchten und die Durchwurzelungstiefen aus den Aufgrabungsfeldern herangezogen. Dazu wurde ein trockener und ein nasser Zeitraum exemplarisch für Lysimeter 9 gewählt und die Mittelwerte der Bodenfeuchte für jede Tiefe gebildet (Abbildung 40).

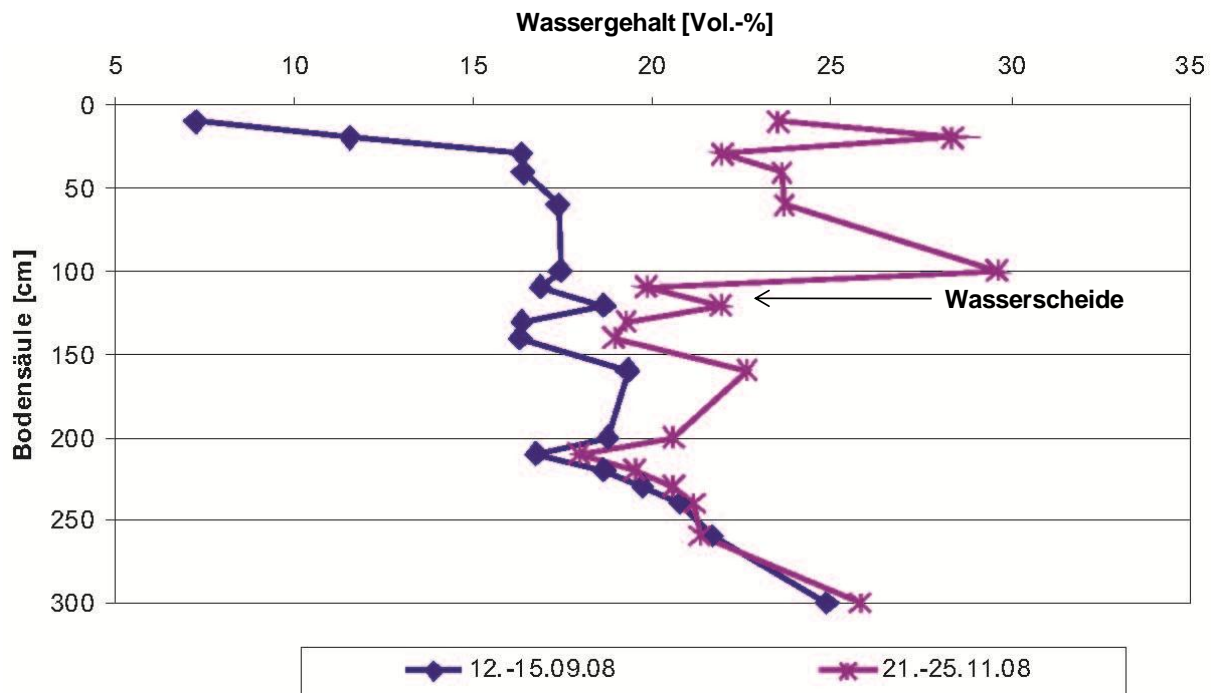


Abbildung 40: Vergleich des Bodenfeuchteverlaufes über die Profiltiefe von Lysimeter 9 (3 m, gemischtkörniger Boden) für einen relativ trockenen Zeitraum (12.09. - 15.09.2008) und einen relativ nassen Zeitraum (21.11. - 25.11.2008)

Die Lage der Wasserscheide ist nicht statisch und ändert sich je nach Infiltration und Verdunstung. Im langjährigen Mittel liegt sie unterhalb der durchwurzelten Bodenzone. Bodenwasser, das bis zur Wasserscheide gelangt, wird größtenteils Sickerwasser.

4.2.2 Saugspannung (Matrixpotenzial)

Zur genaueren Charakterisierung des Bodenwasserhaushaltes ist neben den Änderungen des Wassergehaltes auch die Saugspannung von Bedeutung. Vor allem im Bereich der effektiven Durchwurzelung spielen Änderungen der Wasserspannungen eine Rolle, da u. a. entsprechende Rückschlüsse auf mögliche Trockenstressphasen für die Vegetation gezogen werden können.

Die Wasserspannungsänderungen in der Durchwurzelungszone der Lysimeter 3, 5 und 7 wurden mit EQ 15-Sonden gemessen. Durch den breiten Messbereich (bis $pF = 4,2$ bzw. 15.000 hPa oder 15 bar) sind sie zur Erfassung der Saugspannungen bis in den Bereich des PWP geeignet.

Aufgrund der größtenteils unplausiblen bzw. fehlerbehafteten absoluten und relativen Messdaten, ist eine wissenschaftlich fundierte Auswertung der Equitensiometermessungen nicht möglich. Inwieweit einbaubedingte mess- und/oder datenerfassungstechnische Fehler dazu führten, konnte bis zum Abschluss dieser Arbeit nicht geklärt werden.

Um mögliche Wasserstaueffekte oberhalb der stark verdichteten Bodenschicht ($D_{Pr} = 100\%$) an den Lysimetern 3, 4 und 5 zu erfassen und zu bewerten, wurden in diesen Bereichen die

T8-Tensiometer eingebaut. Die Lysimeter 8 und 10 (ohne $D_{Pr} = 100\%$ Schicht) besitzen ebenfalls diese Messtechnik, um einen Vergleich bzgl. dem Vorhandensein und den Einfluss einer stark verdichteten Schicht bewerten zu können.

Die Abbildung 41 stellt die Tensionsverläufe in den unterschiedlichen Lysimetern grafisch dar.

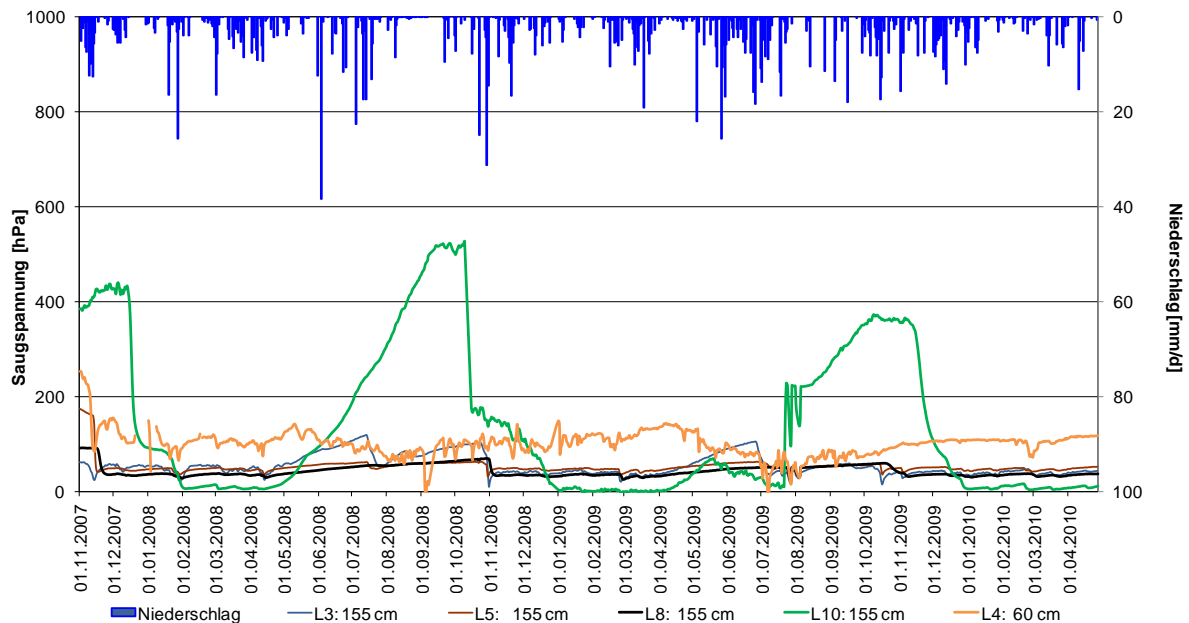


Abbildung 41: Verlauf der Saugspannungen in den Lysimetern 3 (2 m, bindiger Boden, Beregnung), Lysimeter 4 (1 m, bindiger Boden), Lysimeter 5 (2 m, gemischtkörniger Boden, Beregnung), Lysimeter 8 (1,6 m, gemischtkörniger Boden) und Lysimeter 10 (1,6 m, bindiger Boden)

Die gemessenen Wasserspannungen in 1,55 m u. GOK in den Lysimetern 3 und 5 korrelieren sehr gut mit den Ausführungen von SCHOENHERR et al. [2011] bzgl. der Bodenfeuchte für diese Lysimeter. Die Verläufe zeigen einen simultanen Verlauf zwischen 10 - 100 hPa und liegen demnach im Bereich der FK. Dem Verlauf der Tensionskurven des Bodenmaterials in den Lysimetern 3 und 5 kann eine jahreszeitliche Abhängigkeit nachgewiesen werden.

Die gemessenen Wassergehalte bei 1,55 m u. GOK liegen im Bereich des Wassergehaltes bei FK. Die Tensionen in Lysimeter 8 (1,55 m) zeigen Saugspannungen von 10 - 100 hPa an. Aufgrund der geringeren Einbautiefe in Lysimeter 4 (0,6 m u. GOK) ist in diesem Lysimeter ein größerer Einfluss der Verdunstung durch die Vegetation erkennbar. Die Saugspannung unterliegt geringfügig größeren Schwankungsbereichen (10 - 200 hPa).

Lediglich Lysimeter 10 (1,6 m, bindiger Boden, ohne $D_{Pr} = 100\%$ -Schicht) zeigt größere Saugspannungsamplituden im Jahresverlauf. Dies resultiert aus der Bodencharakteristik und dem daraus resultierenden höherem Speichervermögen. Die hohe FK (ca. 38 - 40 Vol.-%) des bindigen Bodenmaterials erlaubt eine längerfristige Zwischenspeicherung des Wassers

und stellt demnach einen Wasservorrat für die Verdunstung dar. Die maximale Durchwurzelungstiefe von Gras-/Kräuterbewuchs reicht bis in Bodentiefen von ca. 1,2 - 1,5 m. Der Bodenwasserspeicher im Lysimeter 10 wird im hydrologischen Sommerhalbjahr nahezu vollständig geleert. Dies wird in Abbildung 41 anhand der Tensionskurve (grün) für Lysimeter 10 deutlich. Die Wasserspannungen im hydrologischen Winterhalbjahr 2007 resultieren aus den geringen Wassergehalten beim Einbau des Materials. In der 2. Hälfte des hydrologischen Winterhalbjahres ist der Bodenwasserspeicher im Lysimeter zeitweise bis zur Sättigung gefüllt. Die Tensionen liegen temporär zwischen 0 und 5 hPa.

4.2.3 Sickerwasser

Für die Bewertung der Niederschlagsmengen an der Lysimeteranlage in Bautzen/Nadelwitz wurden eigene Messungen sowie die Daten des DWD (Deutscher Wetter Dienst) des Standortes Görlitz verwendet.

Im Untersuchungszeitraum fiel auf die Lysimeter eine Niederschlagsmenge (kumulativ) von 1.720 mm. Die Lysimeter 3 und 5 erhielten, aufgrund der Zusatzberechnung, eine Wassermenge von ca. 1.890 mm bzw. ca. 1.870 mm. Die unterschiedlichen Zusatzberechnungsmengen resultieren aus Optimierungsversuchen bzgl. der Berechnung.

Um ein Einfrieren zu vermeiden, wird die Berechnungsanlage in den Wintermonaten abgeschaltet.

Die Durchsickerungsmengen in den Lysimetern steigen über die Wintermonate an. Der relative Verlauf der Durchsickerung aller Lysimeter mit bindigem Boden ist nahezu parallel, wobei die ersten hydraulischen Reaktionen (Sickerwasserabflüsse) zu unterschiedlichen Zeitpunkten stattfinden.

In Abbildung 42 sind die kumulativen Sickerwasser- und Niederschlagsmengen für die Lysimeter mit bindigen Böden dargestellt.

An allen Lysimetern tritt im März Sickerwasser an der Basis der Lysimeter aus. Dies ist mit ansteigenden Temperaturen und daraus resultierenden Schneeschmelze- und Auftauprozessen verbunden. Die dadurch stoßartig eindringende Wassermenge führt bei Überschreitung der FK zum Sickerwasseraustritt. Ein Großteil des infiltrierten Niederschlagswassers perkoliert durch die Bodensäule. Die Klimaentwicklung für die Region Bautzen zeigt ansteigende Niederschlagsmengen im I. Quartal des Kalenderjahres, was zu einem noch höheren Wasserdargebot führt. Demzufolge sind höhere Sickerwassermengen zu erwarten.

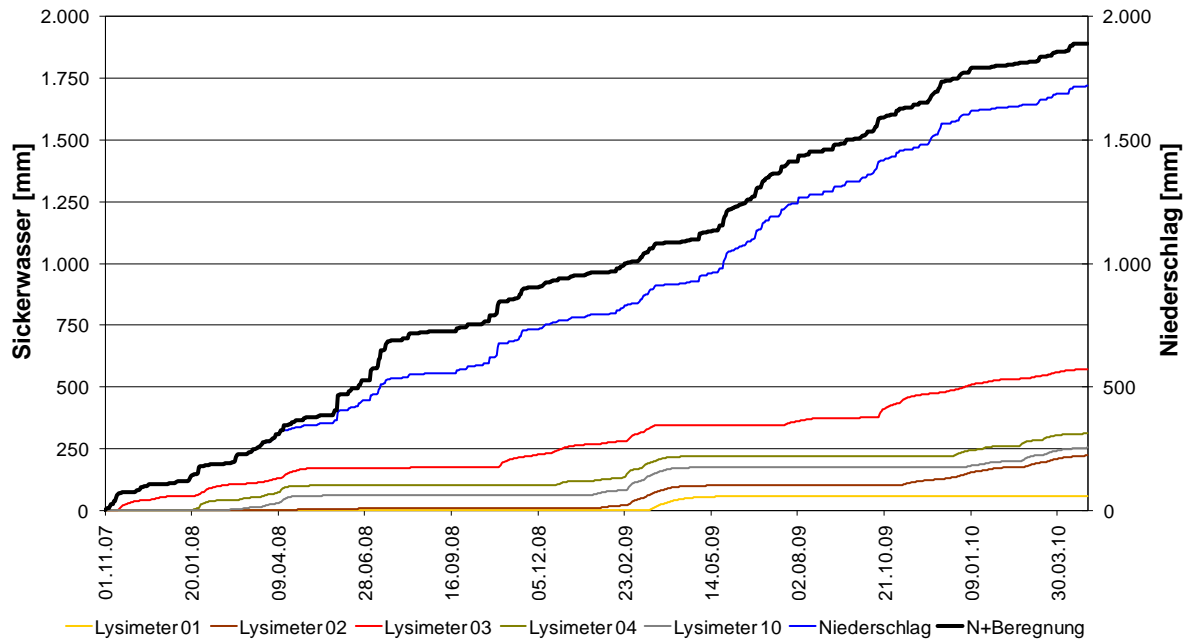
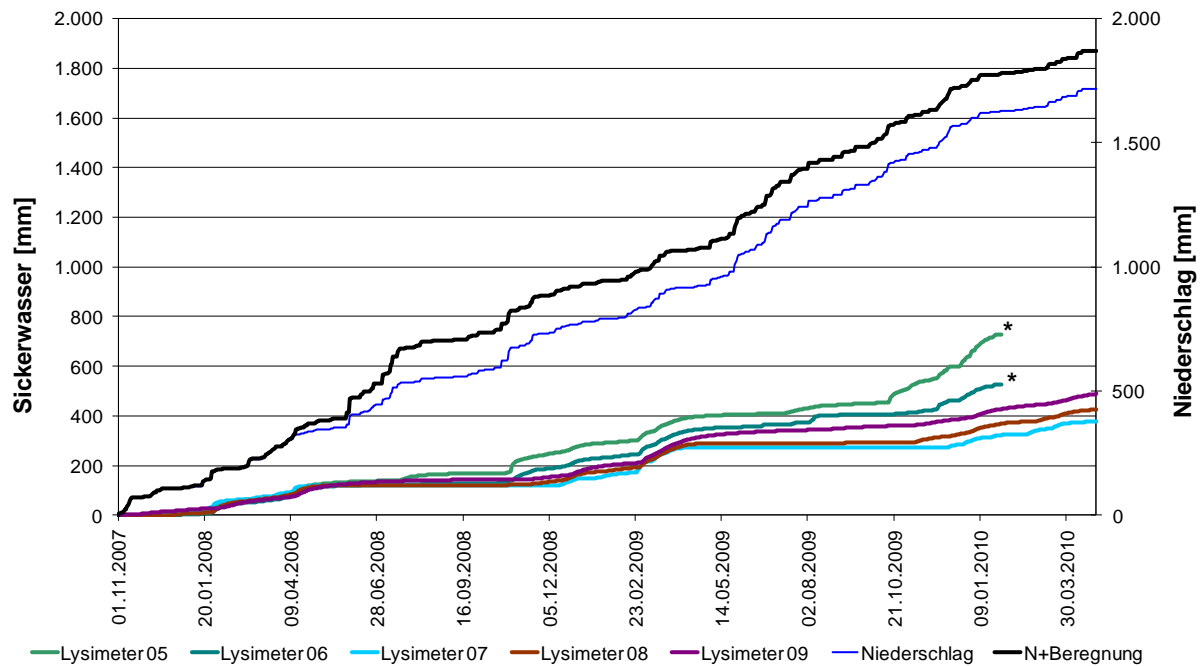


Abbildung 42: Kumulative Niederschlags- und Sickerwassermengen der Lysimeter mit bindigen Böden

Die bindigen Böden bieten gute Voraussetzungen für die Speicherung dieses Wasserdargebots. Für die Nutzung des Wassers durch Pflanzen bzw. die Verhinderung der Infiltration in die Entwässerungsschicht ist eine ausreichende und intensive Durchwurzelung der Bodenschicht (Unterboden bzw. Wasserspeicherschicht) notwendig. Primär durch die Verdunstung der Pflanzen wird der Bodenwasserspeicher in den Folgemonaten wieder geleert und eine Durchsickerung minimiert.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse hinsichtlich des Durchsickerungsverhaltens des bindigen Bodens wird deutlich, dass im Lysimeter 1 (Bodenmächtigkeit: 3 m) erstmals 03/2009 Sickerwasserabflüsse auftreten. Im Lysimeter 3 (2 m Boden + Beregnung) sind die absoluten Sickerwassermengen im Vergleich zu allen anderen Lysimetern sehr hoch. Dies resultiert aus einer zu hohen Beregnungsmenge (Beregnungsfehler). Demnach ist die kumulative Sickerwasserkurve für Lysimeter 3 deutlich höher (Abbildung 42).

Die Sickerwassercharakteristik in Lysimeter 4 (1 m) macht deutlich, dass mit dem ersten signifikanten Niederschlagsereignissen in 1/2008, erste deutliche Sickerwassermengen auftreten. In Lysimeter 10 (1,6 m mächtige Bodensäule, ohne $D_{Pr} = 100\%$ -Schicht) ist mit den Niederschlagsereignissen Ende 02/2008 das Porensystem soweit mit Wasser gefüllt, dass deutliche Sickerwassermengen erfasst werden konnten. Lysimeter 2 (2 m Bodensäule inkl. 0,4 m mächtige, $D_{Pr}=100\%$ -Schicht) verzeichnet im Vergleich dazu ein deutlich reduziertes Sickerwasseraufkommen. In Abbildung 43 sind die kumulativen Sickerwasser- und Niederschlagsmengen für die Lysimeter mit gemischtkörnigem Boden graphisch dargestellt. Die Kurven für die Lysimeter 5 und 6 sind bis 01/2010 dargestellt (*).



Abbildungung 43: Kumulative Niederschlags- und Sickerwassermengen der Lysimeter mit gemischtkörnigem Boden

Ab 02/2010 liegen aufgrund von Mess- und Datenerfassungsproblemen keine plausiblen Daten vor. Der Verlauf des Sickerwasseraustritts ist für die Lysimeter 5 bis 9 parallel, wobei die absoluten Mengen quantitativ höher sind als bei den Lysimetern mit bindigen Böden. Für den gemischtkörnigen Boden ist deutlich erkennbar, dass unabhängig von der Bodenmächtigkeit ein sehr ähnliches Durchsickerungsverhalten auftritt. Lediglich durch das Lysimeter 5 versickert aufgrund der Zusatzberechnung ab dem III. Quartal des Kalenderjahres 2009 deutlich mehr Wasser. Die jahreszeitliche Abhängigkeit der Versickerungsprozesse in den Lysimetern im hydrologischen Sommer- (SHJ) und Winterhalbjahr (WHJ) ist in Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 20: Mittlere Sickerwassermengen [mm] in den fünf hydrologischen Halbjahren (Sommerhalbjahr SHJ; Winterhalbjahr WHJ) im Zeitraum 11/2007 - 04/2010

Lysimeter	Boden	mittlere Sickerwassermenge [mm] im hydrologischen SHJ	mittlere Sickerwassermenge [mm] im hydrologischen WHJ
1	bindig	3	18
2	bindig	3	72
3	bindig	48	176
4	bindig	2	103
5	gemischtkörnig	89	183
6	gemischtkörnig	46	145
7	gemischtkörnig	1	126
8	gemischtkörnig	5	139
9	gemischtkörnig	41	136
10	bindig	2	84

Die Verteilung der mittleren Sickerwassermengen über die einzelnen hydrologischen Halbjahre untermauert die jahreszeitliche Abhängigkeit der Versickerungsprozesse. Der Effekt ist unabhängig von der Bodenart. Für den Gesamtuntersuchungszeitraum lassen sich die prozentualen Durchflussmengen aller Lysimeter der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz, gemäß Abbildung 44 darstellen.

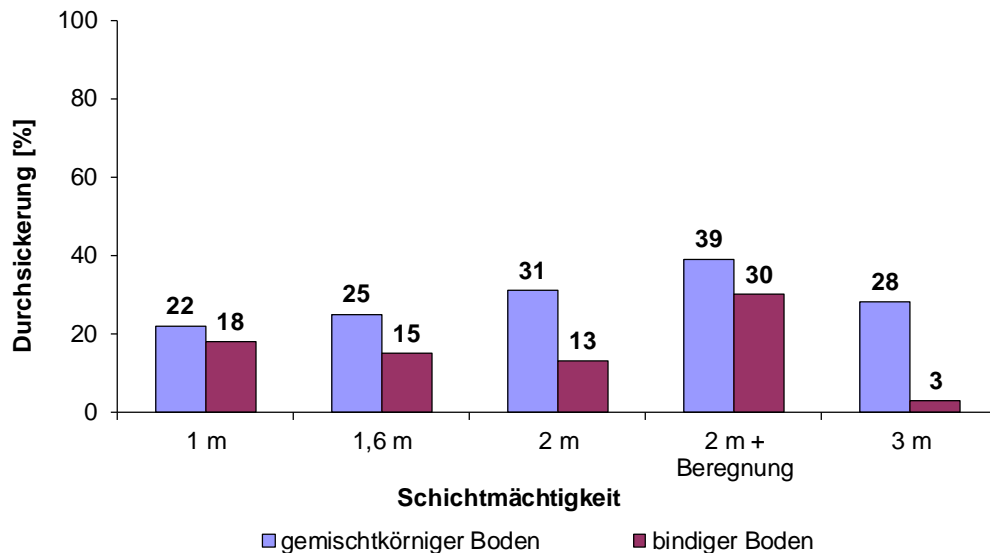


Abbildung 44: Prozentuale Sickerwassermengen der Lysimeter bezogen auf die Niederschlagsmenge an der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz im Zeitraum 11/2007 - 04/2010

Die Charakteristik der Sickerwässer aus Abbildung 44 spiegeln den Einfluss der unterschiedlichen Bodenarten mit den spezifischen Charakteristika (z. B. Porenvolumen, Feldkapazität) wieder. Je kleiner die Schichtmächtigkeit, umso geringer ist die Differenz der prozentualen Sickerwassermengen zwischen den Bodenarten. Am deutlichsten ist der Unterschied zwischen den 3 m mächtigen Lysimetern. Die Durchwurzelungstiefe ist auch eine wesentliche Einflussgröße für die Sickerwassermengen. Die Bodenkörper < 2 m sind fast vollständig durchwurzelt und demnach kann das Bodenwasser des Bodenkörpers nahezu vollständig verbraucht werden. Die angefallenen Sickerwassermengen (Tabelle 20) resultieren aus den hydrologischen Winterhalbjahren, in denen die Pflanzen kaum transpirierten. Aus Tabelle 20 wird deutlich, dass bei den Lysimetern mit gemischtkörnigem Boden eine Zunahme der Sickerwassermenge mit Zunahme der Bodenmächtigkeit vorliegt. Die Lysimeter 6 (2 m Bodensäule) und 9 (3 m Bodensäule) weisen auch im Sommerhalbjahr entsprechende Sickerwassermengen auf. Dies resultiert aus dem gefüllten Bodenwasserspeicher und den Profiltiefen, die nicht signifikant durchwurzelt sind. Je geringer die Mächtigkeit der nicht durchwurzelten Bodensäule der Gesamtbodensäule ist, desto geringer sind die Sickerwassermengen des jeweiligen Lysimeters bei sonst gleichen Rahmenbedingungen.

Im Vergleich zu den Anforderungen der DepV [2009] (< 20 mm/a für DK I; < 60 mm/a für DK II) bezüglich des maximalen Abflusses aus der Wasserhaushaltsschicht kann festgestellt werden, dass die untersuchten Wasserhaushaltsschichten (außer Lysimeter 1) der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz die Vorgaben nicht einhalten (Abbildung 45).

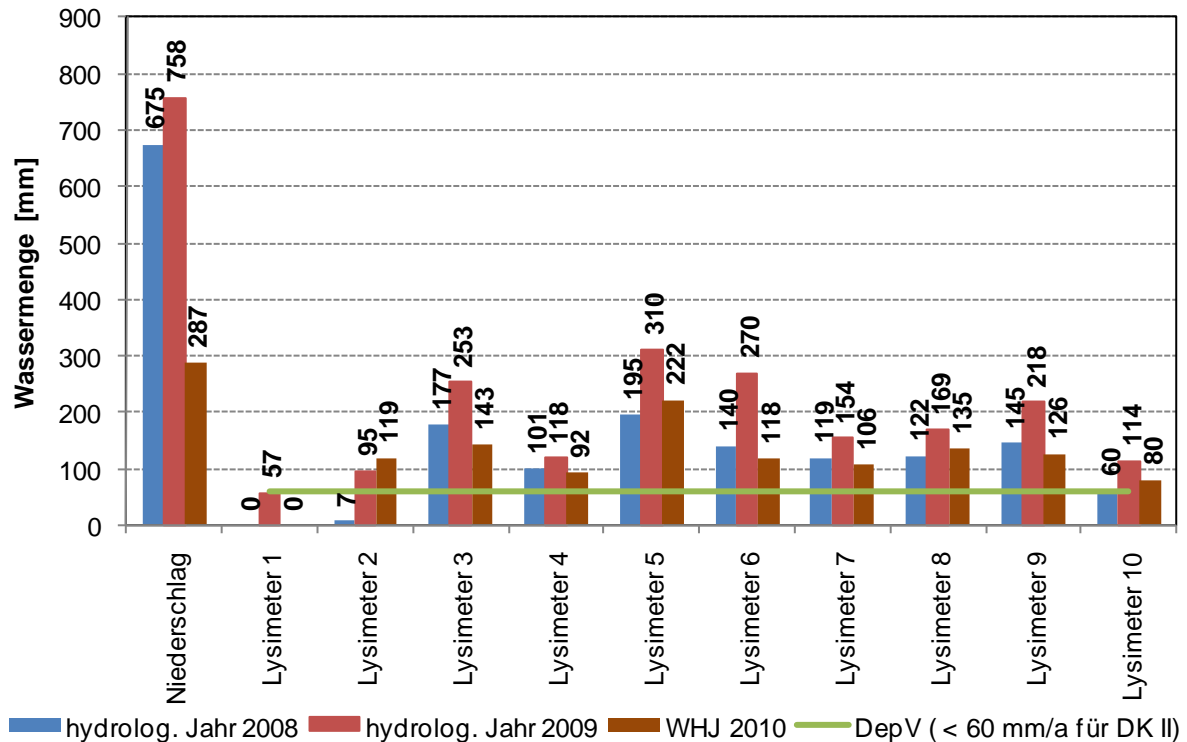


Abbildung 45: Vergleich der jährlichen Sickerwassermengen der Lysimeter bezogen auf die Niederschlagsmenge mit den Vorgaben der DepV [2009] an der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz in den hydrologischen Jahren 2008 - 2010 (in 2010 nur das hydrologische Winterhalbjahr (WHJ)) im Zeitraum 11/2007 - 04/2010

Bei der Wertung der Ergebnisse (Abbildung 45) muss berücksichtigt werden, dass mit dieser Arbeit 2,5 hydrologische Jahre untersucht wurden. In DepV [2009] ist ein Nachweiszeitraum von 5 Jahren nach Herstellung vorgegeben. Die ist vor allem unter dem Aspekt der „Einschwingphase“ der Wasserhaushaltsschichten in den Lysimetern sowie der Bewuchsentwicklung von Bedeutung.

4.3 Vegetation

Zur Beurteilung der Vegetation hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit auf einer Wasserhaushaltsschicht sind die Transpiration, der Bedeckungsgrad und die Durchwurzelungscharakteristik heranzuziehen [LARCHER, 1994; OTTO, 1994; GAERTIG et al., 2000; WATTENDORF, 2001]. Ein Gras- / Kräuterbewuchs kann im Mittel ca. 60% des Niederschlags verdunsten. Das Maximum liegt bei über 80%. Lysimeteruntersuchungen von SCHEER [2001] machen deutlich, dass bei Gras- / Kräuterbeständen sogar Verdunstungsraten von ca. 90% erreicht werden können.

4.3.1 Gesamtdeckungsgrad

Die Vegetationsaufnahme auf den Lysimetern der Lysimeterstation Bautzen/Nadelwitz erfolgte in Anlehnung an die Methode von BRAUN-BLANQUET [1951]. Der Gesamtdeckungsgrad wurde prozentual geschätzt und sagt aus, welcher Anteil Bodenfläche bedeckt wird. Die Aufnahme erfolgte auf den 10 Lysimetern sowie den Aufgrabungsfeldern am 11. August 2009 und 01. Oktober 2010. Die Untersuchungsflächen zeigen 2009 eine heterogene Vegetationsverteilung (Abbildung 46). Die Gesamtdeckungsgrade schwanken zwischen 60% (z. B. Lysimeter 9) und 100% (z. B. Lysimeter 3), wobei die dominierenden Pflanzenarten das Deutsche Weidelgras (*Lolium perenne*) mit ca. 50% und der Weißklee (*Trifolium repens*) mit ca. 30% sind. Eine eher untergeordnete Rollen spielen z. B. der Rotklee (*Trifolium pratense*), die jährige Rispe (*Poa annua*), der Rotschwingel (*Festuca rubra*), der Hasenklee (*Trifolium arvense*) und die Ackerkratzdistel (*Cirsium arvense*).

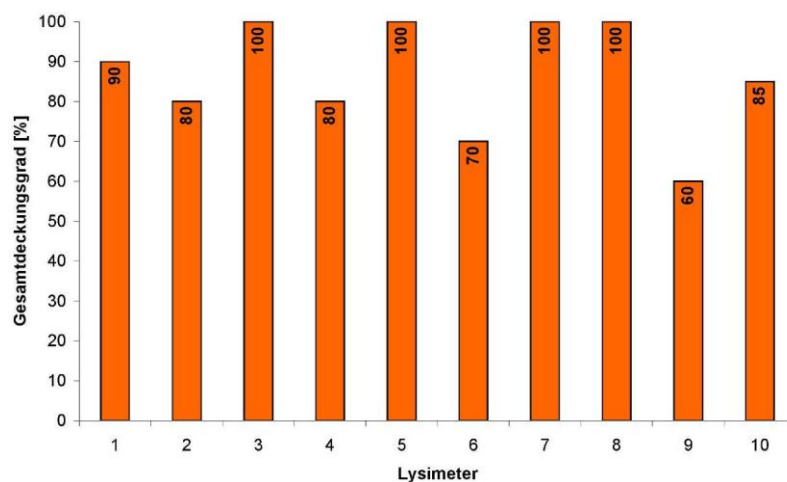


Abbildung 46: Gesamtdeckungsgrade auf den Untersuchungsflächen der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz im Jahre 2009

Das Gesamtbild der Artenzusammensetzung entspricht annähernd der Ansaatmischung (Tabelle 18) nach ca. einjähriger Wuchszeit. Durch vorhandene Samen im Oberbodenmaterial, den Antransport von Samen durch Tiere sowie durch Anflug wird die Artenvielfalt erweitert. Die insgesamt geringen Unterschiede in der Artenzusammensetzung auf den Lysimetern und dem direkt angrenzenden Umland (inkl. Aufgrabungsfelder) sind vor allem darauf zurückzuführen, dass die Flächen identisches Oberbodenmaterial aufweisen, gleiches Saatgut eingesetzt wurde und sie gleich bewirtschaftet werden. Des Weiteren werden sie alle von einheitlichen Umgebungsfaktoren beeinflusst.

Im Jahre 2010 erfolgte auf den Lysimetern 2 (2 m, bindiger Boden), 3 (2 m, bindiger Boden, Beregnung), Lysimeter 5 (2 m, gemischtkörniger Boden) sowie Lysimeter 8 (1,6 m, gemischtkörniger Boden) eine Abnahme der Gesamtdeckungsgrade (Abbildung 47). Bei diesen Lysimetern kam es zu einem Rückgang um ca. 10%, wobei Lysimeter 2 mit 70% den

geringsten Gesamtdeckungsgrad der Lysimeter aufweist. Lysimeter 5 (2 m, gemischtkörniger Boden) zeigt einen Rückgang auf geschätzte 95% Gesamtdeckungsgrad.

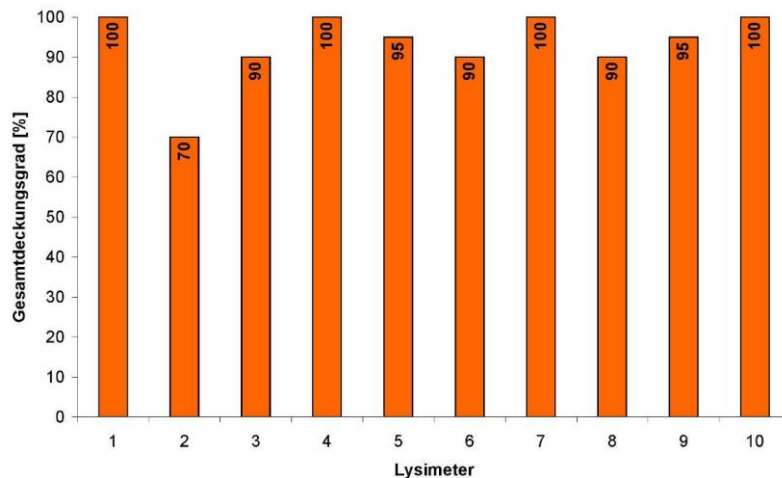


Abbildung 47: Gesamtdeckungsgrade auf den Untersuchungsflächen der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz im Jahre 2010

Der Gesamtdeckungsgrad auf Lysimeter 7 (1 m, gemischtkörniger Boden) ist mit 100% konstant geblieben. Auf allen weiteren Lysimetern wurden teilweise deutliche Zunahmen ermittelt. Bei Lysimeter 9 (3 m, gemischtkörniger Boden) ist diese Zunahme mit ca. 35% besonders stark.

Lag der durchschnittliche Gesamtdeckungsgrad im Jahre 2009 bei 86%, so kann für das Jahr 2010 eine Zunahme um ca. 7% auf durchschnittlich 93% ausgewiesen werden. Dabei nahm er auf den Lysimetern mit bindigem Boden um 5% (2009: 87%; 2010: 92%) und bei den Lysimetern mit gemischtkörnigem Boden um 8% (2009: 86%; 2010: 94%) zu.

Auch 2010 dominierten die Arten Weißklee (*Trifolium repens*) mit ca. 34% und Deutsches Weidelgras (*Lolium perenne*) mit ca. 30%. Im Vergleich zum Jahr 2009 ist der Deckungsgrad des Deutschen Weidelgrases (*Lolium perenne*) rückläufig. Die Änderung des Deckungsgrades zum Jahr 2009 lässt sich u. a. dadurch erklären, dass sich einige Pflanzenarten besser an die gegebenen Standortbedingungen (Boden, Klima) anpassen können. Für das Deutsche Weidelgras (*Lolium perenne*) sind kalte und schneereiche Winter ungünstig. Die Art verträgt weder nasse noch trockene Böden [PETERSEN, 1988]. Daher kann ein weiterer Rückgang des Weidelgrases in den folgenden Jahren nicht ausgeschlossen werden. Auf Lysimeter 1 dominieren Ackerkratzdisteln (*Cirsium arvense*) mit einem Anteil von 75%. Die starke Ausbreitung auf diesem Lysimeter kann u. a. damit begründet werden, dass die Ackerkratzdistel (*Cirsium arvense*) sich über Wurzelknospen ausbreitet [KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 1992] und im Bodenmaterial vermutlich Wurzelreste vorhanden waren.

Der in der Saadmischung vorhandene Rotschwingel (*Festuca rubra*) vermag sich besser durchzusetzen. Sein Deckungsgrad liegt zwischen 5% (z. B. Lysimeter 1) und 40% (z. B. Lysimeter 3) und hat damit zum Jahr 2009 deutlich zugenommen. Von Natur aus kommt der

Rotschwingel (*Festuca rubra*) in vielen Mittelgebirgslagen vor [PETERSEN, 1988] und ist daher besser an die Witterungsbedingungen in Bautzen angepasst, als das Deutsche Weidelgras (*Lolium perenne*). Es ist davon auszugehen, dass der Rotschwingel (*Festuca rubra*) in den Folgejahren im Artenspektrum stärker auftritt.

4.3.2 Durchwurzelungscharakteristik

Neben der Bestimmung des Gesamtdeckungsgrades auf den einzelnen Lysimetern ist für die Bewertung des Wasserhaushaltes einer Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht der entsprechende Wasserverbrauch durch die Pflanzen (Transpiration) von wesentlicher Bedeutung.

Dabei spielen insbesondere die Durchwurzelungstiefe und -dichte eine Rolle, die Gegenstand von speziellen Untersuchungen an den Aufgrabungsfeldern der Lysimeteranlage waren.

Die sechs Aufgrabungsfelder wurden jeweils bis zu einer Bodentiefe von 1,6 m beprobt. Für den ersten Bodenmeter erfolgte die Sondierung mit einem Sondendurchmesser von 80 mm und im zweiten Bodenmeter mit einem Durchmesser von 60 mm. Es wurde jeweils eine Mischprobe über jeder Beprobungsebene gewonnen.

Das Waschen der Wurzeln erfolgte in Anlehnung an ROWELL [1997]. Danach kamen die Wurzeln bis zur Gewichtskonstanz bei 100 °C in den Trockenschrank. Die Untersuchungsmethodik ist detailliert in KLEFFLING [2010] beschrieben. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 21 zusammengefasst.

Tabelle 21: Durchwurzelungstiefe in den Aufgrabungsfeldern der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz im Jahre 2010

Aufgrabungsfeld	Boden/Mächtigkeit	Wurzeltiefe [m]
1a	bindig / 3,0 m	1,2
3a	bindig / 2,0 m	1,6
5a	gemischtkörnig / 2,0 m	1,0
8a	gemischtkörnig / 1,6 m	0,8
9a	gemischtkörnig / 3,0 m	0,6
10a	bindig / 1,6 m	1,0

Derartige maximale Durchwurzelungstiefen konnten auch im Rahmen von Felduntersuchungen an Wasserhaushalts- oder Rekultivierungsschichten an anderen Standorten nachgewiesen werden [HAUBRICH, 2010; MELCHIOR, 2010].

In den Aufgrabungsfeldern unterscheiden sich die Durchwurzelungstiefen deutlich (Tabelle 21). Im Aufgrabungsfeld 3a ist die Durchwurzelung bis ca. 1,6 m am weitesten in der Bodensäule vorgedrungen. Das Feld 9a weist mit 0,6 m die geringste Durchwurzelungstiefe

auf. Bei dem bindigen Boden zeichnet sich eine mittlere Durchwurzelungstiefe von ca. 1,3 - 1,5 m und bei dem gemischtkörnigen Boden von ca. 0,8 - 1,0 m ab. Die ermittelten Werte korrespondieren mit den Angaben zur effektiven Durchwurzelungstiefe dieser Böden gemäß KA5 [AG BODEN, 2005].

Inwieweit die Durchwurzelungstiefen aus den Aufgrabungsfeldern mit denen in den Lysimetern korrelieren, kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht ausgewiesen werden, da die Lysimeter nicht aufgegraben werden um die Messungen bzgl. Wasserhaushalt und Setzung nicht zu beeinflussen. Es kommt zu unterschiedlichen Durchwurzelungsintensitäten in den einzelnen Bodentiefen (Abbildung 48).

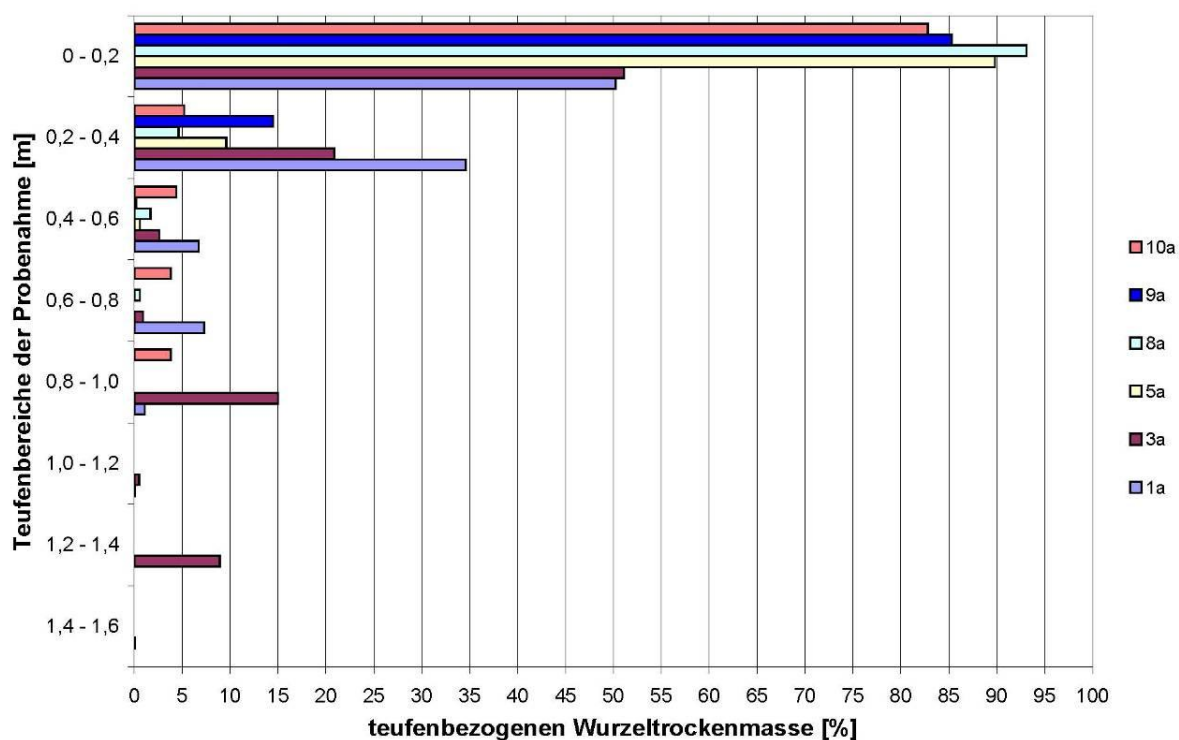


Abbildung 48: Teufenbezogene Wurzeltrockenmassen [%] aus den Aufgrabungsfeldern (Probenahme: Oktober 2009)

Die Aufgrabungsfelder mit gemischtkörnigem Boden sind dadurch charakterisiert, dass durchschnittlich ca. 90% der Wurzeln im Oberboden wachsen. Dies deckt sich mit Aufgrabungsergebnissen von MELCHIOR [2010a]. Bei dem bindigen Boden sind dagegen lediglich ca. 65% der Wurzelmasse im Oberboden und 35% im Unterboden lokalisiert. Dies lässt sich auf eine bessere Nährstoffversorgung im bindigen Boden zurückführen, sowie dem höheren Feinkornanteil, welcher zu einer Porenverteilung führt, die einerseits eine größere Wasserspeicherung erlaubt und andererseits noch eine ausreichend große Luftkapazität gewährleistet.

Der Übergang der Wassergehalte von Oberboden zu Unterboden ist in den bindigen Böden fließend. Der Unterschied des Wassergehaltes bei FK liegt bei 8 Vol.-%. Dabei nimmt die FK

beim Übergang vom Oberboden zum Unterboden zu, d. h. im Unterboden kann mehr Wasser gespeichert werden. Bei den Lysimetern mit gemischtkörnigem Boden ist der Übergang von Oberboden zu Unterboden durch eine deutliche Abnahme des Wassergehaltes bei FK gekennzeichnet. Der Anreiz der Wurzeln in die Tiefe zu wachsen, ist daher auf dem bindigen Boden größer als auf dem gemischtkörnigen Boden.

Die Wurzeln innerhalb des Oberbodenmaterials können im hydrologischen Sommerhalbjahr temporär unter Trockenstress geraten. In sehr langanhaltenden Trockenperioden bleiben Trockenstresseffekte nicht nur auf das Oberbodenmaterial beschränkt [PARKIN et al., 2000]. Eine Auffälligkeit zeigt das Wurzelprofil im Aufgrabungsfeld 3a. Im Vergleich zu den anderen Aufgrabungsfeldern ist in einigen Tiefen (0,8 - 1,0 und 1,2 - 1,4 m u. GOK) eine Wurzelzunahme zu verzeichnen. Dies lässt sich auf das Vorhandensein der Ackerkratzdisteln (*Cirsium arvense*) zurückführen, die in unmittelbarer Nähe zur Probenahmestelle wachsen.

4.3.3 Evapotranspiration

Die Evapotranspiration stellt in vielen Gebieten Deutschlands die größte Ausgabegröße (Verbrauchsgröße) des Wasserhaushalts einer Wasserhaushaltsschicht dar [BERGER, 2010].

Die Bestimmung der tatsächlichen Verdunstung ist an einen hohen technischen Aufwand (z. B. mikrometeorologische und pflanzenphysiologische Methoden) gebunden.

Komplexe Naturvorgänge können vereinfacht durch die mathematische Beschreibung der physikalischen Zusammenhänge oder durch empirische Beziehungen zwischen leicht verfügbaren Größen hinreichend genau beschrieben werden.

Die PENMAN-MONTEITH-Beziehung zur Berechnung der potenziellen Pflanzenverdunstung ist der am häufigsten angewendete Berechnungsansatz. Die tatsächliche Verdunstung [mm/d] kann mit Gl. 3 nach PENMAN-MONTEITH für Tageswerte berechnet werden [ATV-DVWK, 2002].

$$ETR = \frac{1}{L} \cdot \frac{s \cdot (R_n - G) + \rho_L \cdot c_p \cdot \frac{e_s(T) - e}{r_a}}{s + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (3)$$

ETR ... tatsächliche Verdunstung [mm/d]; L ... spezielle Verdunstungswärme [W/m²/(mm/d)];

s ... Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve [hPa/K]; R_n ... Nettostrahlung [W/m²];

G ... Bodenwärmestrom [W/m²]; ρ_L ... Luftdichte [1,2 kg/m³];

c_p ... spezifische Wärme der Luft bei konst. Druck [1005 J/(kg K)];

e_s(T) ... Sättigungsdampfdruck [hPa]; e ... aktueller Dampfdruck [hPa]

r_a ... aerodynamischer Widerstand [s/m]; r_c ... Bestandswiderstand [s/m]

γ ... Psychrometerkonstante [0,65 hPa/K]; T ... Lufttemperatur [°C]

Die Bestimmung der einzelnen Größen der PENMAN-MONTEITH-Gleichung für den Standort der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz ist in KLEFFLING [2010] dargelegt.

Die Gras-Referenzverdunstung stellt einen international anerkannten Berechnungsansatz für die potenzielle Verdunstung dar. Dieser Verdunstungsansatz ist vom Wasserdargebot sowie der Bestandsart und -entwicklung unabhängig. Dadurch wird die Vergleichbarkeit der Berechnungsergebnisse für unterschiedliche Standorte ermöglicht [ALLEN et al., 1994; WENDLING, 1995].

Die Grundlage für den Ansatz bildet die PENMAN-MONTEITH-Beziehung [ZENKER, 2003]. Diese Beziehung gilt für einen einheitlichen ganzjährig 0,12 m hohen Grasbestand mit ausreichender Wasserversorgung. Die Parameter Bestandeswiderstand r_c und aerodynamischer Widerstand r_a sowie die Albedo μ_A sind in ATV-DVWK [2002] definiert. Die Berechnung von r_a erfolgt in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, welche in zwei Metern Höhe gemessen wird [ATV-DVWK, 2002]. Werden die o. g. Randbedingungen in Gl. 3 eingesetzt, so ergibt sich die Verdunstung [mm] (Gl. 4) ATV-DVWK [2002]:

$$ET_0 = \frac{s \cdot Rn^*}{s + \gamma^*} + \frac{90 \cdot \gamma}{s + \gamma^*} \cdot v_2 \cdot \frac{e_s(T)}{T + 273} \cdot \left(1 - \frac{U}{100}\right) \quad (4)$$

Rn^* ... Verdunstungsäquivalent [mm/d] der Nettostrahlung;

γ^* ... modifizierte Psychrometerkonstante [hPa/K]; T ... Lufttemperatur [°C];

U ... relative Luftfeuchte [%]; ET_0 ... Verdunstung [mm]

Die Ermittlung der einzelnen Glieder aus Gl. 4 sind in KLEFFLING [2010] detailliert beschrieben. Die Berechnung der tatsächlichen Verdunstung (ETR) aus der Bodenfeuchteänderung erfolgt mit Gl. 5 nach DYCK & PESCHKE [1995].

$$ETR = P - R - \Delta S \quad (5)$$

ETR ... tatsächliche Evapotranspiration [mm/Δt]; P ... Niederschlag [mm/Δt];

R ... Abfluss/Sickerwasser [mm/Δt]; ΔS ... Änderung der Bodenfeuchte [mm/Δt]

In der Abbildung 49 werden die Werte ausgewählter Lysimeter vom Standort Bautzen/Nadelwitz und Zittau (ZÖF) für die monatliche Verdunstung im Vergleich zur Gras-Referenzverdunstung für Bautzen (Zeitraum 2007/2008) graphisch dargestellt.

Aufgrund von Datenausfällen ist eine Auswertung der ETR nur bedingt möglich. Für vergleichende Betrachtungen wurden neben den ETR-Werten für die Lysimeter der Lysimeterstation in Bautzen/Nadelwitz auch die ETR-Werte der Lysimeterstation ZÖF in Zittau involviert.

Genauere Ausführungen zur Lysimeteranlage und zur Datengewinnung bzw. -auswertung für den Standort Zittau sind in SEIDLER [1998], MERTA [2001] und FJODOROWA [2003] zu finden.

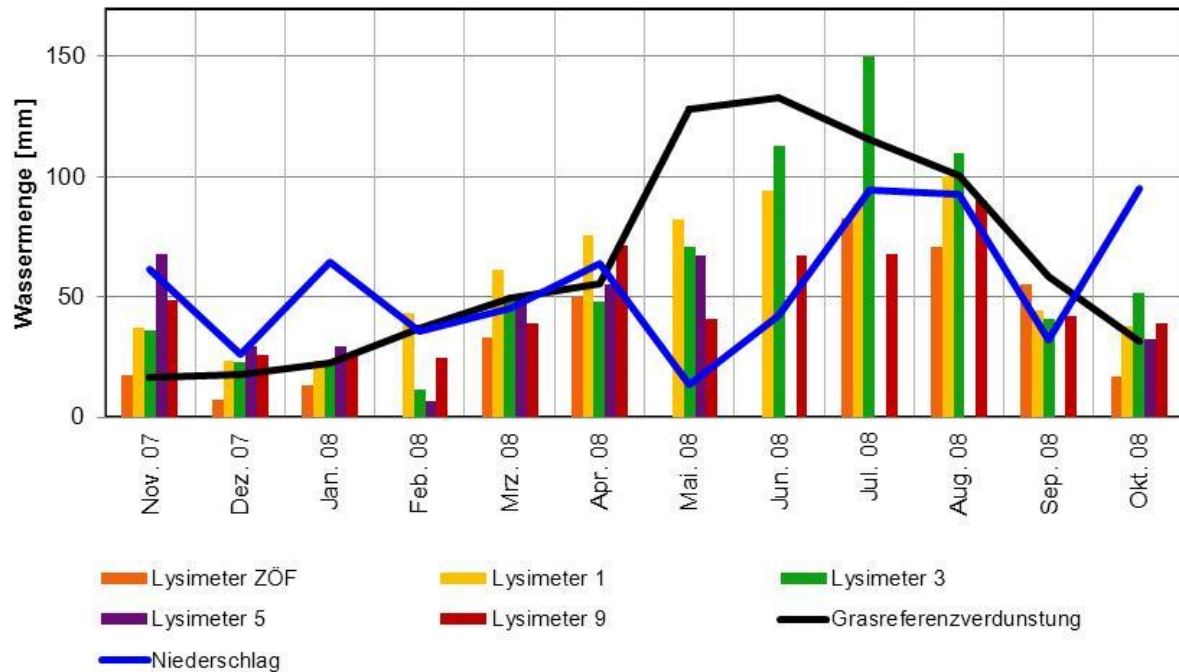


Abbildung 49: Verdunstung ausgewählter Lysimeter der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz im Vergleich zur Verdunstung des Lysimeters ZÖF (Zittau) und der Gras-Referenzverdunstung im hydrologischen Jahr 2007/08

Im Vergleich der beiden Lysimeter mit 3 m Bodensäule verdunstet das Lysimeter 1 (bindiger Boden) bei gleichem Niederschlag ca. 130 mm/a mehr als das Lysimeter 9 (gemischtkörniger Boden). Bis auf die Wintermonate wird vom Lysimeter 1 immer eine größere Wassermenge verdunstet.

Die geringere Verdunstung von Lysimeter 9 ist u. a. auf die geringe FK (ca. 22 Vol.%) bzw. nFK (ca. 17 Vol.%) des gemischtkörnigen Bodens und den geringen Gesamtdeckungsgrad sowie die geringe Durchwurzelung zurückzuführen.

Lysimeter 3 weist in den Sommermonaten gegenüber den anderen Lysimetern die größte Verdunstungsmenge auf. Diese liegt im Sommer bei ca. 90 mm über der Verdunstung von Lysimeter 1. Dies ist primär auf die größere Wassermenge durch die Beregnung, den höheren Gesamtdeckungsgrad und die größte Durchwurzelungstiefe (max. 1,6 m u. GOK) zurückzuführen.

In der Abbildung 50 ist die monatliche Verdunstung für das hydrologische Jahr 2009 graphisch dargestellt.

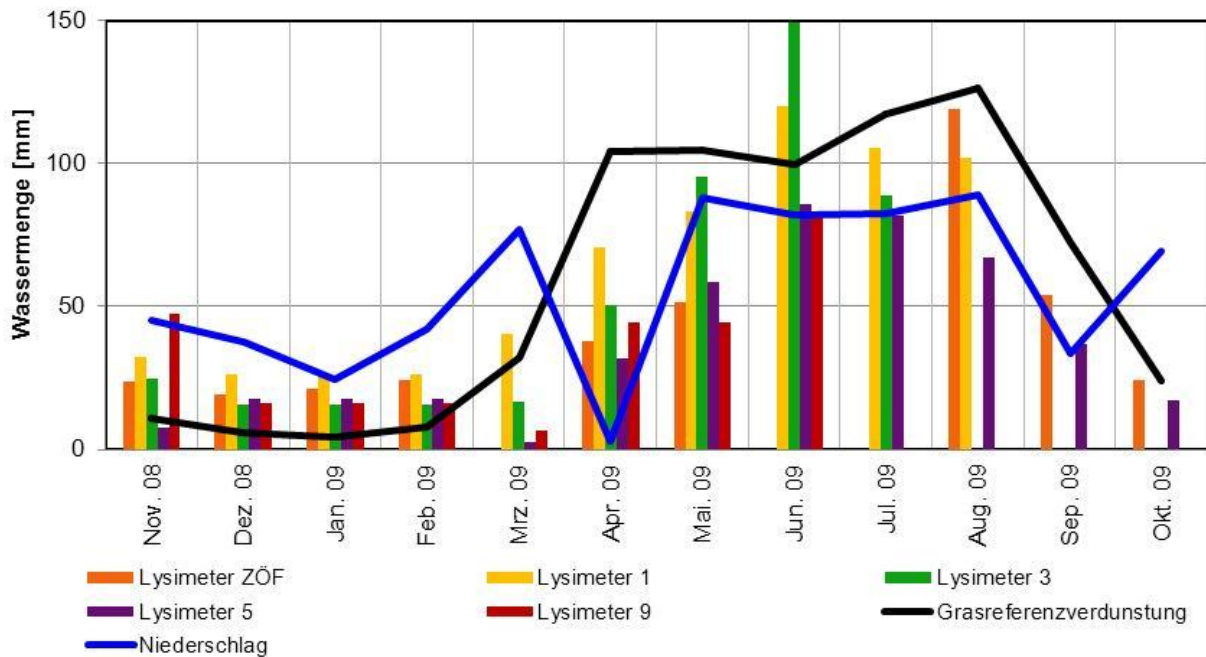


Abbildung 50: Verdunstung ausgewählter Lysimeter der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz im Vergleich zur Verdunstung des Lysimeters ZÖF (Zittau) und der Gras-Referenzverdunstung im hydrologischen Jahr 2008/09

Von Lysimeter 1 verdunstete in den Wintermonaten eine geringfügig höhere Menge Wasser als von den anderen Lysimetern. Die Verdunstung von Lysimeter 1 liegt in sieben von acht Monaten über der Verdunstung des Lysimeters 9. Dies ist auf die höhere FK bzw. nFK des bindigen Bodens, den höheren Gesamtdeckungsgrad, den höheren Pflanzenbestand und die bessere Durchwurzelung zurückzuführen. Die größte monatliche Verdunstung wurde von der Vegetation auf Lysimeter 3 mit 149 mm erreicht. Dies ist u. a. auf die fast reine Grasvegetation zurückzuführen, die eine größere Bestandshöhe erreicht als die Bestände mit Weißklee (*Trifolium repens*).

Die berechnete Gras-Referenzverdunstung unterschätzt in den Wintermonaten deutlich die Verdunstung auf den Lysimetern. Aufgrund von Datenausfällen konnten keine verlässlichen Jahressummen zum Vergleich der ETR auf den Lysimetern gebildet werden. Es lässt sich aber erkennen, dass auch 2009 von den bindigen Böden mehr Wasser verdunstet, als von den gemischtkörnigen Böden.

Festzustellen ist, dass die tatsächliche Verdunstung in den Wintermonaten an der Lysimeterstation in Zittau geringer als auf den Lysimetern in Bautzen ist. Eine ähnliche Charakteristik ist für die Sommermonate auszuweisen. Im Winter liegt das an den niedrigeren Temperaturen im Vergleich zu Bautzen. In den Sommermonaten ist die kleinere Verdunstung u. a. durch den geringeren Niederschlag verursacht, die geschütztere Lage der ZÖF und durch einen stärkeren Windeinfluss (Turbulenz) in Bautzen, da die Lysimeter höher liegen als das Umfeld. Ebenso spielt der Bodenwasservorrat eine entsprechende Rolle.

Die pflanzenspezifischen Untersuchungen zeigen für den Standort der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz, dass die aufgebrachte bzw. die sich entwickelnde Gras- / Kräutermischung eine geeignete Vegetationsform für eine Wasserhaushaltsschicht darstellt. Die angesäte Vegetation unterliegt einer Dynamik im Verlaufe der Entwicklung. Dies ist von natürlichen und anthropogenen Randbedingungen abhängig. Die Vegetationsentwicklung auf den Lysimetern innerhalb der zwei Untersuchungsjahre belegt dies.

4.4 Systemwirksamkeiten

Um die Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Wasserhaushaltsschichten unter natürlichen und anthropogenen Randbedingungen in den Lysimetern vergleichen zu können, wurden die Systemwirksamkeiten (Verhältnis von austretendem Sickerwasser zum auftreffenden Niederschlag) nach Gl. 6 berechnet und in Abbildung 51 grafisch dargestellt.

$$\eta = 100 - (Q \cdot 100 / P) \quad (6)$$

η ... Wirksamkeit [%]; Q ... Abfluss [mm]; P ... Niederschlag [mm]

Dabei werden die Unterschiede aufgrund der Charakteristika des gemischtkörnigen und des bindigen Bodens deutlich.

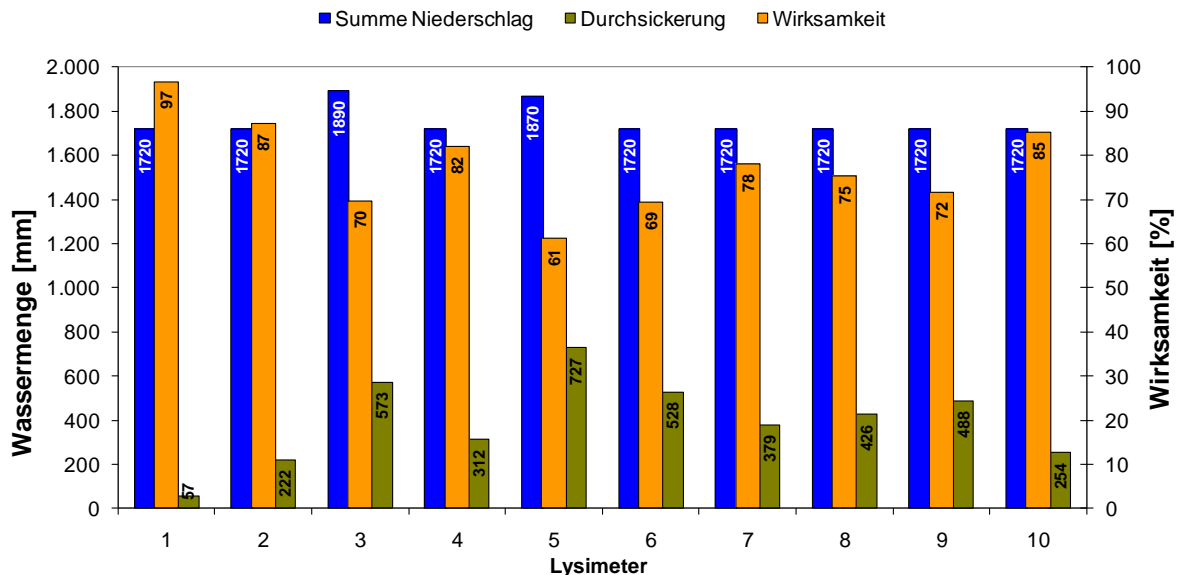


Abbildung 51: Wirksamkeiten der Wasserhaushaltsschichten der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz in Abhängigkeit vom Niederschlag für den Zeitraum 11/2007 - 04/2010

Der durchschnittliche Wirkungsgrad der Lysimeter mit gemischtkörnigem Bodenmaterial liegt bei ca. 71%. Lysimeter 5 (2 m, Beregnung) weist mit 61% die geringste und Lysimeter 7 (1 m) mit 78 % die größte Wirksamkeit auf. Der Wirkungsgrad in Lysimeter 5 ist, bedingt durch die ca. 150 mm höhere Wassermenge, geringer. Da bereits das vergleichbare

Lysimeter 6 (2 m, ohne Beregnung) einen Wirkungsgrad von 69% aufweist und die wasserhaushaltsrelevanten Zustandsgrößen (z. B. Bodenfeuchte) deutlich machen, dass in den Bodentiefen unterhalb von ca. 1,0 - 1,2 m u. GOK kein signifikanter Wasserverbrauch (in Richtung Atmosphäre) mehr stattfindet. Dadurch sind die höheren Sickerwassermengen bzw. der schlechtere Wirkungsgrad erklärbar. Der Wirkungsgrad des Lysimeters 7 mit 78% resultiert aus dem Zusammenhang zwischen Bodenmächtigkeit und max. Durchwurzelung. Da die Durchwurzelungstiefen für einen Gras- / Kräuterbewuchs bei gemischtkörnigen Böden bis zu 1,0 m u. GOK reichen, ist in dem 1 m mächtigen Lysimeter 7 die bestmögliche Ausschöpfung des Bodenwasserspeichers und somit die geringste Sickerwassermenge zu verzeichnen.

Das bindige Bodenmaterial zeigt im hydrologischen Winterhalbjahr gleichfalls geringere Wirksamkeiten. Der Boden kann jedoch aufgrund der größeren FK bzw. des höheren Bodenwasserspeichervolumen mehr Wasser speichern und im Vergleich zu den Lysimetern mit gemischtkörnigen Böden tritt weniger Sickerwasser aus.

Die Wirkungsgrade der Lysimeter (Abbildung 51) mit bindigem Bodenmaterial liegen im Durchschnitt bei ca. 84%. Dabei schwankt der Wirkungsgrad zwischen 70% bei Lysimeter 3 (2 m, Beregnung) und 97% bei Lysimeter 1 (3 m). Der Unterschied von fast 30% Wirksamkeit beruht auf dem Beregnungseinfluss auf Lysimeter 3 sowie deutlich höheren Wasserspeicherkapazitäten des bindigen Materials. Demnach steht den Pflanzen im Durchwurzelungsbereich (bis ca. 1,5 m u. GOK) für den Verbrauch (Evapotranspiration) mehr Bodenwasser über einen längeren Zeitraum zur Verfügung. Bei einer FK von 38 Vol.-% sind dies für die Bodenschicht etwa 456 mm.

Die erreichten Wirksamkeiten im hydrologischen Sommer- (SHJ, Abbildung 53) und Winterhalbjahr (WHJ, Abbildung 52) der Lysimeter am Standort der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz zeigen deutliche Parallelen zu vergleichbaren Untersuchungen an Testfeldern der MEAB (Märkische Entsorgungsanlagen Betriebsgesellschaft) auf der Deponie Deetz im Bundesland Brandenburg [MELCHIOR et al., 2010].

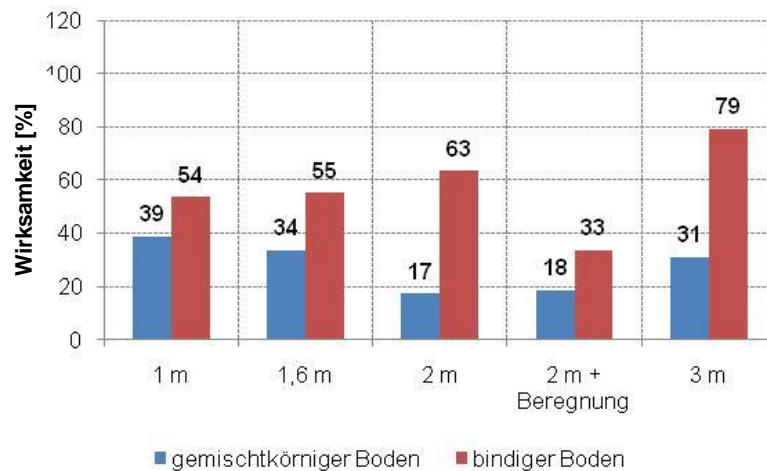


Abbildung 52: Wirksamkeiten der Lysimeter der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz in Abhängigkeit von der Schichtmächtigkeit im hydrologischen Winterhalbjahr 2009

Die Abbildung 52 und Abbildung 53 verdeutlichen, dass eine Schichtmächtigkeit von > 2 m keinen markanten Wirksamkeitserfolg bringt.

Für den gegenwärtigen Bewuchs (Gras- / Kräuter) und der maximalen Durchwurzelungstiefe von ca. 1,2 - 1,5 m u. GOK zeigt sich über den Versuchszeitraum hinweg, dass die Lysimeter mit einer Mächtigkeit von 1 m, 1,6 m und 2 m die besten Wirksamkeiten haben.

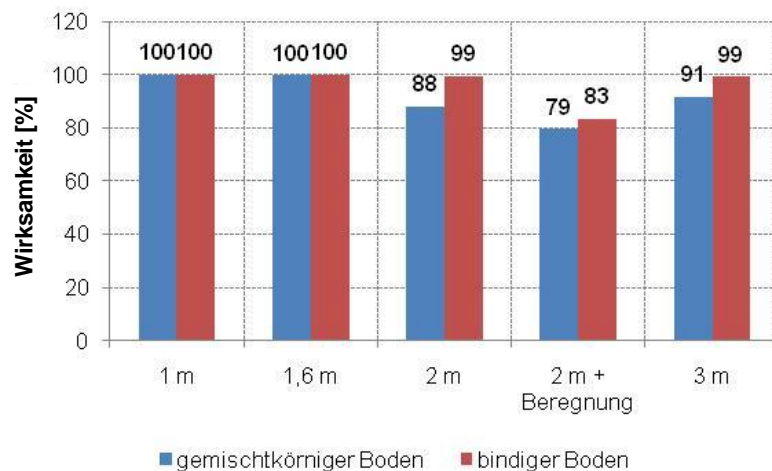


Abbildung 53: Wirksamkeiten der Lysimeter der Lysimeterstation Bautzen/Nadelwitz in Abhängigkeit der Schichtmächtigkeit im hydrologischen Sommerhalbjahr 2010

Bodenmächtigkeiten, die deutlich größer sind als die effektive Durchwurzelungstiefe in der Bodensäule, stellen potenziellen Speicherraum für infiltriertes Niederschlagswasser dar, der nicht mehr durch Evapotranspiration entleert wird. Deshalb ist die Mächtigkeit in Abhängigkeit von der Durchwurzelungstiefe und dem Schutz tiefer liegender Dichtungssystemkomponenten zu bemessen. Langjährige Untersuchungen von NYDEGGER [2010] sowie YANG & YANFUL [2002] bestätigen die Ergebnisse.

Um den Wasserhaushalt und die Wirksamkeit der Lysimeter am Standort Bautzen/Nadelwitz abschließend bewerten zu können, sind differenzierte Aussagen mit Hilfe der Klimatischen

Wasserbilanz (KWB) nach DIN 4049-3 [1994] sinnvoll [RENGER et al., 1974]. Sie stellt die Differenz aus Niederschlag und potenzieller Verdunstung dar [ATV-DVWK, 2002]. In Abbildung 54 und in Abbildung 55 sind die KWB für die hydrologischen Jahre (HJ) 2008 und 2009 dargestellt.

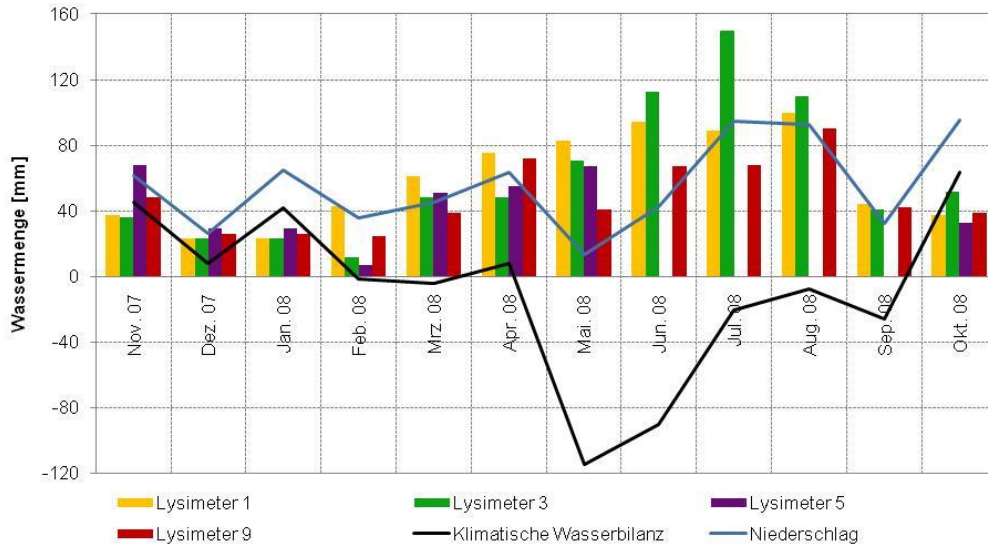


Abbildung 54: Monatliche Verdunstung, monatlicher Niederschlag und die Klimatische Wasserbilanz (KWB) in 2008 an der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

Die KWB der beiden Untersuchungsjahre ist ausgeglichen. Im hydrologischen Jahr 2008 liegt sie bei 2 mm/a und im hydrologischen Jahr 2009 bei 57 mm/a. Diese Werte stimmen gut mit Literaturangaben von 4 mm/a für das Lausitzer Becken überein [ATV-DVWK, 2002]. Werden die Werte der KWB für den Zeitraum 11/2008 bis 03/2009 (weitgehende Vegetationsruhe) summiert, wird deutlich, dass mindestens ein Bodenwasserspeichervolumen im durchwurzelten Bereich von ca. 250 mm im hydrologischen Winterhalbjahr zur Verfügung stehen muss, damit das Sickerwasser minimiert werden kann.

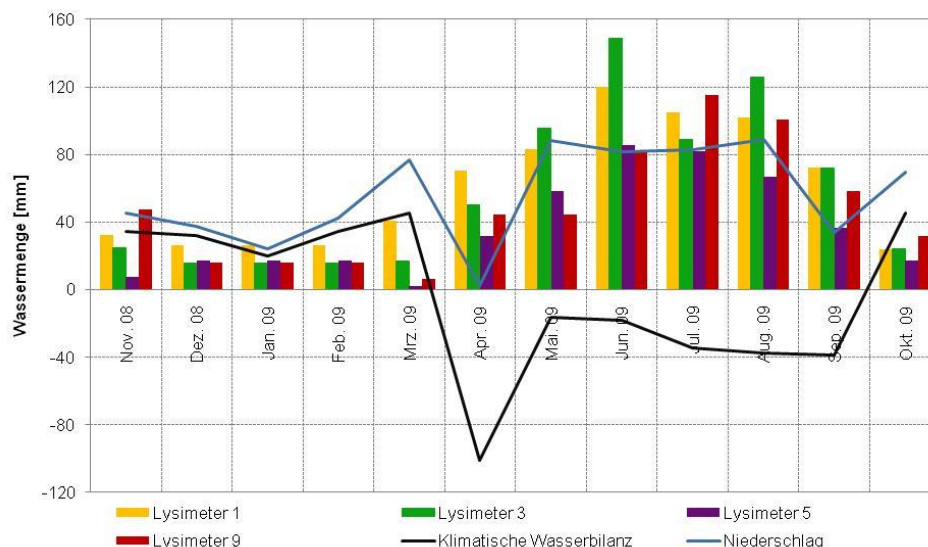


Abbildung 55: Monatliche Verdunstung, monatlicher Niederschlag und die KWB in 2009 an der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz

Werden die negativen Wasserbilanzwerte für die Sommermonate addiert, so ergibt sich ein minimal notwendiger Bodenwasserspeicher von ca. 200 mm, um den Pflanzen ausreichend Wasser für die Verdunstung zur Verfügung zu stellen. Dieser Wert stimmt relativ gut mit den gesetzlichen Anforderungen der DepV [2009] für eine Wasserhaushaltsschicht überein, nach denen eine nFK von 220 mm gefordert wird.

4.5 Wasserhaushaltsmodellierung - BOWAHALD

Simulationsmodelle stellen sehr gute Werkzeuge bzw. Rechenhilfen für komplexe Systeme und Abläufe dar. Gemäß ZEH und WITT [2002] sowie BERGER [2010] lassen diese sich in theoretisch-orientierte und praktisch-orientierte Modelle unterteilen.

Die theoretisch-orientierten Modelle (z. B. HYDRUS, SWIM) werden zur Überprüfung von Hypothesen, Abläufen und Prognosen verwendet. Sie basieren auf komplexen Gleichungen (mathematisch / physikalischen Ursprungs) und Abhängigkeiten. Die Simulationszeiträume und Rechenzeiten sind meist lang, die Benutzerfreundlichkeit eingeschränkt, die Parametrisierung aufwendig und die Handhabung teilweise schwierig [TLUG, 2002].

Die praktisch-orientierten Modelle (z. B. HELP, BOWAHALD) eignen sich vor allem für die Simulation verschiedener Szenarien und Entwurfsvarianten. Die physikalischen Ansätze sind vereinfacht, die Modelle arbeiten schnell und die Handhabung ist relativ einfach [TLUG, 2002].

Neben den experimentellen Freiland- und Laborarbeiten, die im Fokus der Arbeit stehen, erfolgten die Simulationsrechnungen mit Hilfe des anerkannten Programmes BOWAHALD. Dabei wurden die wesentlichen hydrologischen Prozesse innerhalb einer Wasserhaushaltsschicht modelliert. Durch die Nutzung der Software können Spezifika von Halden- bzw. Deponieoberflächen (z. B. hohe Variabilität der pedologischen Eigenschaften der Sicherungsmaterialien, Berücksichtigung eines breiten Spektrums an Nutzungsarten, zeitvariable Vegetationsentwicklung, Integration beliebiger Anfangsbodenfeuchten, Hangneigungen) in relativ einfacher Art und Weise berücksichtigt werden. DUNGER [2007] weist darauf hin, dass BOWAHALD u. a. besonders für Wasserhaushaltsuntersuchungen, für Planungsszenarien hinsichtlich wasserhaushaltlicher Optimierungen und für Fragen der Vegetationsentwicklung sowie dem Stressverhalten von Pflanzen in Abhängigkeit vom Wasserrückhaltevermögen des Rekultivierungsbodens geeignet ist. Genau dies sind wesentlicher Faktoren, die bei der Planung von Wasserhaushaltsschichten von Bedeutung sind. BOWAHALD repräsentiert neben HELP eine anerkannte Software zur Modellierung von hydrologischen Prozessen in Deponiesicherungssystemen [KHIRE et al., 1997; SCHNEIDER et al., 1999; MÜNNICH, 2000; BERGER, 2005; DUNGER, 2005; DUNGER, 2009; BERGER, 2010]. Dabei berücksichtigt BOWAHALD folgende hydrologische Prozesse [DUNGER, 2007]:

- potenzielle und reale Evapotranspiration (inkl. Interzeption und Wasserzehrung aus dem Kapillarsaum),
- Schneeakkumulation- und -ablationsmenge,
- Oberflächenvernässung und -abflussbildung,
- Infiltrations- und Versickerungsprozesse (inkl. Stauwasserbildung)
- hypodermischer Abfluss,
- Restdurchsickerung an der Modellbasis und
- vertikale Bodenfeuchteverteilung.

BOWAHALD ist ein deterministisches Modell und wird innerhalb dieser Modellgruppe den konzeptionellen (Box-)Modellen zugeordnet. Hinsichtlich der räumlichen Diskretisierung ist BOWAHALD als gegliedertes Modell mit elementaren Einheitsflächen zu klassifizieren [DUNGER, 2007]. Ausgehend von DARCY-Gesetz (Beschreibung des eindimensionalen Wasserflusses unter gesättigten Bedingungen; Gl. 7 und Abbildung 56) und in Kombination mit der Kontinuitätsgleichung werden die Versickerungsvorgänge im Modell einfach nachgebildet.

$$Q = k_f \cdot A \cdot (h / l) \quad (7)$$

Q ... Durchfluss [m^3/s]; A ... durchströmte Fläche [m]; l ... Fließlänge [m];

k_f ... gesättigter Durchlässigkeitswert [m/s]; h ... Druckhöhenunterschied [m];

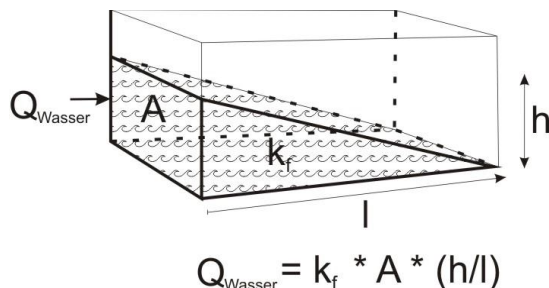


Abbildung 56: Erläuterung des Darcy-Gesetzes [HÖLTING & COLDEWEY, 2005, verändert]

Die direkte analytische Lösbarkeit sowie die unkomplizierte Parametrisierung sind wesentliche Vorteile des DARCY-Gesetzes gegenüber dem RICHARDS-Ansatz (z. B. in HYDRUS, SiWaPro-DSS). Ein wesentlicher Nachteil ist in der Berücksichtigung von lediglich dem Gravitationspotenzialeinfluss zu sehen [DUNGER, 2007].

Im Modellierungsergebnis werden für die hydrologisch relevanten Prozesse (Oberflächenabfluss, Versickerung, Verdunstung (inkl. Interzeption) und laterale Abflussbildung) entsprechende Ausgabewerte berechnet. Die Detailschritte zur Berechnung der einzelnen Simulationsergebnisse sowie der prinzipielle Aufbau des Modells sind in den wissenschaftlichen Ausführungen von ECKART & DUNGER [1999] und DUNGER [2007] beschrieben.

Da die Funktionalität einer Wasserhaushaltsschicht durch die Zehrung und Wiederbefüllung des Bodenwasserspeichers charakterisiert wird, sind die Teilmodelle „Verdunstung“ und „Versickerung“ innerhalb von BOWAHALD von Bedeutung [DUNGER, 2009]. Hinsichtlich der Modellierung des Deponiewasserhaushaltes mittels BOWAHALD sind nachfolgende Eingabeparameter bzw. Parametergruppen zu identifizieren [DUNGER, 2007]:

- pedologische Parameter
- geographisch-morphologische Parameter
- Bewuchsparameter

Die Ergebnisse aus den Voruntersuchungen bilden die Grundlage für die Modellrechnungen mit BOWAHALD.

Pedologische Parameter:

Der notwendige vertikale Schichtaufbau ist durch den Bodeneinbau in die Lysimeter vorgegeben (vgl. Tabelle 22 bzw. Kapitel 3.4).

Tabelle 22: Vertikaler Schichtenaufbau der Lysimeter der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz als Input zur Modellierung

Lysimeter	Mächtigkeit [m]	Material
1	0,2 2,4 0,4	Oberboden bindiger Boden ($D_{Pr} = 92\%$) bindiger Boden ($D_{Pr} = 100\%$)
2	0,2 1,4 0,4	Oberboden bindiger Boden ($D_{Pr} = 92\%$) bindiger Boden ($D_{Pr} = 100\%$)
3	0,2 1,4 0,4	Oberboden bindiger Boden ($D_{Pr} = 92\%$) bindiger Boden ($D_{Pr} = 100\%$)
4	0,2 0,4 0,4	Oberboden bindiger Boden ($D_{Pr} = 92\%$) bindiger Boden ($D_{Pr} = 100\%$)
5	0,2 1,4 0,4	Oberboden gemischtkörniger Boden ($D_{Pr} = 92\%$) gemischtkörniger Boden ($D_{Pr} = 100\%$)
6	0,2 1,4 0,4	Oberboden gemischtkörniger Boden ($D_{Pr} = 92\%$) gemischtkörniger Boden ($D_{Pr} = 100\%$)
7	0,2 0,4 0,4	Oberboden gemischtkörniger Boden ($D_{Pr} = 92\%$) gemischtkörniger Boden ($D_{Pr} = 100\%$)
8	0,2 1,4	Oberboden gemischtkörniger Boden ($D_{Pr} = 100\%$)
9	0,2 2,4 0,4	Oberboden gemischtkörniger Boden ($D_{Pr} = 92\%$) gemischtkörniger Boden ($D_{Pr} = 100\%$)
10	0,2 1,4	Oberboden bindiger Boden ($D_{Pr} = 92\%$)

Für die genutzten Böden wurden folgende charakteristische Parameter für die Modellierung angesetzt (Tabelle 23). Diese resultieren aus den Untersuchungen der Kapitel 3.4.2 bis 3.4.5.

Tabelle 23: Übersicht über die pedologischen Parameter der Böden der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz für die BOWAHALD-Modellierung

	k_r-Wert [m/s]	Sättigung [Vol.-%]	FK [Vol.-%]	PWP [Vol.-%]
Lysimeter 1 bis 4:				
Oberboden	$9,4 \cdot 10^{-6}$	40	30	7
bindiger Boden ($D_{Pr} = 92 \%$)	$3 \cdot 10^{-8}$	45	38	15
bindiger Boden ($D_{Pr} = 100\%$)	$2 \cdot 10^{-8}$	45	39	16
Lysimeter 5 bis 7 und 9:				
Oberboden	$9,4 \cdot 10^{-6}$	40	30	7
gemischtkörniger Boden ($D_{Pr} = 92\%$)	$9 \cdot 10^{-6}$	37	18	5
gemischtkörniger Boden ($D_{Pr} = 100\%$)	$6 \cdot 10^{-7}$	37	18	5
Lysimeter 8:				
Oberboden	$9,4 \cdot 10^{-6}$	40	30	7
gemischtkörniger Boden ($D_{Pr} = 92\%$)	$9 \cdot 10^{-6}$	37	18	5
Lysimeter 10:				
Oberboden	$9,4 \cdot 10^{-6}$	40	30	7
bindiger Boden ($D_{Pr} = 92 \%$)	$3 \cdot 10^{-8}$	45	38	15

Geographisch-morphologische Parameter:

- geographische Breite des Standortes: 51° , $10'$ n. Br.
- mittlere Höhenlage der Lysimeter: ca. 201 m ü. HN
- Oberflächengefälle: 0 % (keine Neigung der Lysimeter)

Bewuchsparameter:

Als Bewuchs wurde ein üppig entwickelter Grasbewuchs angenommen, dessen Vegetationsbedeckungsgrad lysimeterspezifisch angesetzt wurde (Kapitel 4.3).

Beim Modellierungsstart wird der Realität entsprechend von einer unbewachsenen Oberfläche ausgegangen. Die betrachteten Durchwurzungstiefen basieren auf den Untersuchungsergebnissen aus dem Kapitel 4.3.

Die Randbedingungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- vorrangiger Bewuchs: Gras-/Krautbewuchs
- Gesamtbedeckungsgrad: siehe Kapitel 4.3 (Abbildung 46 und Abbildung 47)
- Vegetationsentwicklung: üppig
- maximale Wurzeltiefen (Bewuchsentwicklung erst am Beginn):
 - Lysimeter mit bindigen Boden: 1,5 m
 - Lysimeter mit gemischtkörnigen Boden: 1,0 m

Meteorologische Daten:

Für die Modellrechnungen wurden die Tageswerte der DWD-Station Görlitz verwendet. Gemäß den Ausführungen in Kapitel 3.3 ist eine Übertragung der meteorologischen Daten des DWD-Standort Görlitz auf den Standort Bautzen möglich. Der Berechnungszeitraum definiert sich entsprechend des Beobachtungszeitraums von 11/2007 bis 04/2010. Meteorologische Input-Daten sind die Tagesmitteltemperatur, das Tagesmittel der relativen Luftfeuchte, die Tagessumme der Sonnenscheindauer sowie die Tagessumme des Niederschlages. Bei den Lysimetern 3 und 5 wurde die Niederschlagsmenge inkl. der Zusatzberegung angesetzt.

Eine Modellkalibrierung erfolgte anhand der pflanzenspezifischen k_C -Faktoren und der Vegetationsentwicklung.

In Tabelle 24 sind die vergleichenden Ergebnisse aus der Modellierung mit BOWAHALD und den Felduntersuchungen bzgl. der Sickerwassermengen an der Basis der Lysimeter der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz dargestellt. Die Kombination aus praktisch-orientierten Modell und Lysimetermessungen stellen sich für Wasserbilanzbetrachtungen als sehr zweckmäßig heraus [GERLACH, 2007].

Tabelle 24: Vergleichende Betrachtung der gemessenen und modellierten (BOWAHALD) Sickerwassermengen der Lysimeter der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz (11/2007 - 04/2010)

Lysi- meter	Boden	Mächti- gkeit [m]	P [mm]	BOWAHALD		Lysimeter		$Q_B - Q_L$
				ETR [mm]	Q_B [mm]	ETR [mm]	Q_L [mm]	
1	bindig	3,0	1.720	1.350	370	1.663	57	313
2	bindig	2,0	1.720	1.346	374	1.498	222	152
3	bindig	2,0 [#]	1.890	1.276	614	1.317	573	41
4	bindig	1,0	1.720	1.335	385	1.409	311	74
5	gemischtk.	2,0 [#]	1.870	1.328	542	1.143	727	-185
6	gemischtk.	2,0	1.720	1.360	360	1.192	528	-168
7	gemischtk.	1,0	1.720	1.359	361	1.341	379	-18
8	gemischtk.	1,6	1.720	1.360	360	1.294	426	-66
9	gemischtk.	3,0	1.720	1.371	349	1.232	488	-139
10	bindig	1,6	1.720	1.398	322	1.466	254	68

P ... Niederschlag; [#] ... mit Beregung; ETR ... reale Evapotranspiration; Q ... Durchsickerung

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass im Falle des gemischtkörnigen Bodens in den Lysimetern mit den geringen Schichtmächtigkeiten (Lysimeter 7 und 8) eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und modellierten Werten zu verzeichnen ist. Das 1 m mächtige Lysimeter 7 zeigt eine minimale Durchsickerungsdifferenz zwischen Modell und Feldversuch von ca. 20 mm im Untersuchungszeitraum auf. Mit zunehmender

Schichtmächtigkeit wird die Differenz der Durchsickerung größer. Insgesamt werden die Durchsickerungsmengen mittels BOWAHALD zu gering berechnet. Sie liegen ca. 20% unterhalb Durchsickerungsmengen, die in den Feldversuchen an den Lysimetern der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz ermittelt wurden.

Bei Betrachtung der Ergebnisse aus den Lysimetern mit bindigem Boden ist die geringste Sickerwasserdifferenz am Lysimeter 3 (2 m mächtig mit Beregnung) festzustellen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der erhöhte Anfangswassergehalt des Bodens (Beregnungsfehler) im Modell nicht genau wiedergespiegelt wird. Werden alle Lysimeter mit bindigem Boden (Lysimeter 1 bis 4 und 10) betrachtet, zeigt sich eine Zunahme der Durchsickerungsdifferenzen zwischen Modellrechnung und Feldversuch mit zunehmender Schichtmächtigkeit.

Die ausgewählten Ergebnisse (Tabelle 24) zeigen bei den geringmächtigen Bodensäulen annähernd gleiche Werte der Felduntersuchungen im Vergleich zur Ermittlung der Sickerwassermengen mit BOWAHALD. Die Unterschiede der Lysimeter mit Schichtdicken von bis zu 2,0 m sind gering. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die tatsächliche Vegetationsentwicklung im speziellen Fall nicht durch das Modell wiedergespiegelt werden kann, da die Durchwurzelungstiefen aus den Aufgrabungsfeldern stammen. Alle sonstigen Modellparameter wurden an den Lysimetern gewonnen.

Bei der Nutzung des Modells „BOWAHALD“ bei bindigen Böden werden die Sickerwassermengen zu hoch bzw. die Verdunstung zu gering berechnet (im Vergleich zu den Feldversuchen). Derartige Unterbewertungen der Verdunstung zeigt DUNGER [2007] auch an den Lysimeteruntersuchungen am Standort Brandis (Sachsen) auf.

Zu berücksichtigen ist, dass sich die Lysimeter nach einer ca. 2,5-jährigen Versuchszeit wahrscheinlich immer noch in einer Einschwingphase befinden. Dieser Sachverhalt kann mittels der Simulationssoftware nicht berücksichtigt werden.

Gleichfalls muss berücksichtigt werden, dass die Simulationssoftware „BOWAHALD“ die Bodenwasserbewegung ausschließlich für gesättigte Bedingungen nachbildet. Derartige gesättigte Bedingungen liegen i. d. R. in den Lysimetern nicht vor. Mögliche Stauwasserbildungen konnten mit Hilfe der Tensiometermessungen nicht nachgewiesen werden. Folglich wirkt im Simulationsmodell als einzige treibende Kraft das Gravitationspotenzial. Der ungesättigte Fluss, die Diffusion von Wasserdampf und der kapillare Aufstieg können nicht direkt erfasst werden. Modelle zur Darstellung von Bodenwasserbewegungen in ungesättigten Böden (z. B. „HYDRUS2D“, „SiWaPro-DSS“) haben in den letzten Jahren Einzug in die Modellierung von Oberflächenabdichtungssystemen gefunden.

Trotz der genannten „Schwächen“ stellt das Modell „BOWAHALD“ (wie auch „HELP“) ein praxiserprobtes und anerkanntes Planungsinstrument dar, welches jedoch nicht alleinige

Planungsgrundlage für Wasserhaushaltsschichten sein sollte. Aus der Kombination von Modellergebnissen und realen Lysimetermessungen lassen sich realitätsnahe Wasserbilanzen erstellen. Voraussetzung sind langjährige und gesicherte Datenreihen sowie Qualitätskontrollen bzgl. nachfolgender Kriterien [SCHOENHERR et al., 2005; SCHNEIDER et al., 2006; BERGER, 2010]:

- Abstraktion (Begründung der Schichttypzuordnung),
- Datenerhebung (in-situ und/oder aus Datenbanken),
- Konzeptionelles Modell (Vorstellung zum Fließverhalten im Dichtungssystem),
- Mathematisches Modell (Auswahl eines geeigneten Wasserhaushaltsmodells),
- Verifizierung (Plausibilitätsprüfung der Eingangsdaten),
- Kalibrierung und Validierung sowie
- Sensitivitätsanalyse (Quantifizierung der Auswirkung von Bodenparametervariationen im Rahmen ihrer jeweiligen „natürlichen Bandbreite“).

Eine umfassende Auswertung von langzeitorientierten Testfeld- / Lysimeteruntersuchungen (z. B. Untersuchungsergebnisse dieser Arbeit bzw. von SCHOENHERR et al. [2011] und von BEHLING [2010]) stellen eine gute Basis für die Validierung von Wasserhaushaltsmodellen dar.

Vorteil beider o. g. Modelle sind die umfangreichen Kalibrierungen und Validierungen. Zwar stehen für das Modell „BOWAHALD“ nicht derart ausgiebige und umfangreiche Validierungsstudien wie für das Modell „HELP“ zur Verfügung, trotzdem kann, auf Basis der Modellkalibrierungen und der Angaben der Anwendungsgrenzen „BOWAHALD“ empfohlen und verwendet werden [DUNGER, 2007; BERGER, 2010].

5 Interdisziplinärer methodischer Ansatz

Die im Kapitel 4 dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass bei der planerischen Auslegung und Wirksamkeitsbewertung von Wasserhaushaltsschichten die isolierte Betrachtung allein unter den Gesichtspunkten der einzelnen Fachdisziplinen (z. B. Geotechnik, Bodenkunde) nicht zielführend sein kann. Dies trifft gleichfalls für die in der DepV [2009] getroffene Verengung auf Schichtstärke und nFK zu. Mit der vorliegenden Arbeit wird daher das Ziel verfolgt, fachübergreifenden Ansatz für die Auslegung und den Bau von Wasserhaushaltsschichten zu entwickeln.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen an der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz sowie Veröffentlichungen zu langzeitorientierten Testfeld- und Lysimeteruntersuchungen an unterschiedlichen Standorten in Deutschland [KONOLD et al.,

2004; BAUMERT et al. 2006; EGLOFFSTEIN et al., 2009; MAIER-HARTH, 2009; HAUBRICH, 2010] stellen die Grundlage für die Ableitung eines interdisziplinären Ansatzes dar.

Die Nutzung von vorhandenem bzw. zu beschaffendem Rekultivierungsmaterial stellt Deponiebetreiber häufig vor große Herausforderungen [PRANTL & BRANDNER, 2010]. Dabei wird i. d. R. versucht, unter dem Aspekt der Minimierung von Transportwegen und ökonomischen Aufwendungen vorhandenes Bodenmaterial zu nutzen.

Steht geeignetes Bodenmaterial zur Verfügung, das am Standort angefallen ist und dort zwischengelagert wurde, ist dies vorrangig zu verwenden. Dies bedeutet, dass standortnahen regionaltypischen Böden der Vorrang vor extern angelieferten Böden zu geben ist.

Ist dies nicht möglich, müssen geeignete Böden beschafft werden. Dazu sind detaillierte Ausschreibungen notwendig, in denen die Qualitätsanforderungen an das Material vorgegeben werden sollen. Dabei ist zu berücksichtigen, welche Transportentfernungen ökologisch und ökonomisch noch sinnvoll erscheinen, um die Anforderungen an die Bodenmaterialien für eine Wasserhaushaltsschicht noch zu erfüllen.

Gemäß den Ausführungen von EGLOFFSTEIN et al. [2009] sind Transportentfernungen von über 60 km durchaus keine Seltenheit und werfen die Frage nach der ökologischen und ökonomischen Sinnhaftigkeit solcher Maßnahmen auf.

Sind die qualitativen Anforderungen an das Material zu hoch angesetzt, kann dies zu erheblichen finanziellen Mehraufwendungen führen. Somit sind die Qualitätsanforderungen an die Böden im Zuge von großtechnischen Baumaßnahmen unter Berücksichtigung des Bodenwasser- und -lufthaushalts, der geotechnischen Einbauanforderungen und der pflanzenspezifischen Anforderungen (in Abhängigkeit vom Rekultivierungsziel) sinnvoll auf die standortbezogene Baumaßnahme abzustimmen [HAUBRICH, 2010].

Dabei ist immer zu berücksichtigen, dass die wesentlichen Komponenten einer Wasserhaushaltsschicht Boden und Bewuchs sind. Das Wechselspiel beider ist von wesentlicher Bedeutung für die Funktionalität [FEDDES et al., 1988; MARKWARDT, 2009; DUNGER et al., 2010; SCHOENHERR et al., 2011].

Die o. g. Gründe verdeutlichen, wie wichtig ein praxisnahes Hilfswerkzeug für die schnelle Bewertung und Beurteilung von Böden hinsichtlich ihrer Eignung als Rekultivierungsmaterial, im Speziellen als Material für Wasserhaushaltsschichten, ist. Zur einfachen Abschätzung der Eignung bzw. zur Festlegung von spezifischen Qualitätsanforderungen an das Bodenmaterial wurde ein entsprechendes Instrumentarium geschaffen.

Voraussetzung für die Nutzung des Hilfsmittels sind Kenntnisse über:

- das Ziel der Rekultivierungsmaßnahme (z. B. Abdichtung, Grundwasseranstieg)
- die Feinbodenart
- die Geometrie der zu rekultivierenden Fläche (z. B. Neigung, Böschungslänge)
- die Klimatische Wasserbilanz (KWB) für den Standort
- die geplante Begrünung (z. B. Gras-/Kräutermischung, Wald)

Die Abschätzung bzw. Bestimmung der Feinbodenart im Gelände erfolgt mit der Fingerprobe und nach sichtbaren Merkmalen (DIN 19682-2 [2007] bzw. DIN ISO 11259 [2000]) oder im Labor nach DIN ISO 11277 [2002].

Ergänzt wird dieses Instrumentarium durch die Anwendung des Dreiecksnetzes der Phasenzusammensetzung nach RUDERT [1971; 1977]. Dies erlaubt die Festlegung der Einbauanforderungen an das ausgewählte Boden- bzw. Rekultivierungsmaterial auf der Basis der Phasenzusammensetzung. Mit Hilfe dieses Dreiecksnetzes können spezifische Einbauvorgaben (keine direkten Werte sondern Bereiche) ausgewiesen werden, unter denen das Prinzip einer Wasserhaushaltsschicht standortspezifisch realisierbar ist. Das Anwenderspektrum des Instrumentariums reicht von den planenden und ausführenden Ingenieuren bis zu den genehmigungsrechtlichen Entscheidungsträgern.

5.1 Feinbodenartendiagramm nach KA5 bzw. DIN 4220

Die Korngrößenzusammensetzung des mineralischen Bodenmaterials bestimmt die Bodenart. Dabei wird differenziert zwischen der Kornfraktion des Feinbodens (Äquivalentdurchmesser < 2 mm) und des Grobbodens (Äquivalentdurchmesser ≥ 2 mm). Aufgrund der bodenphysikalischen Anforderungen an Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschichten werden im Folgenden ausschließlich die Feinbodenarten betrachtet [AG Boden, 2005]. Bei feinkörnigen Böden aus Schluff (U), Sand (S) und Ton (T) sind teilweise Überkornanteile (Kies- und Steine in der Bodenmatrix) vorhanden, die i. d. R. unerheblich sind [EGLOFFSTEIN et al., 2009].

Maßgebend für die Definition der einzelnen Bodenarten innerhalb des Spektrums der Feinböden sind die Fraktionen Sand (Durchmesser: 0,63 mm bis < 2 mm), Schluff (Durchmesser: 0,02 mm bis $< 0,63$ mm) und Ton (Durchmesser: $< 0,02$ mm). Kommen die drei Fraktionen in erkennbaren und fühlbaren Gemengeanteilen im Dreikorngemenge vor, wird die Feinbodenart als „Lehm (L)“ bezeichnet [AG Boden, 2005].

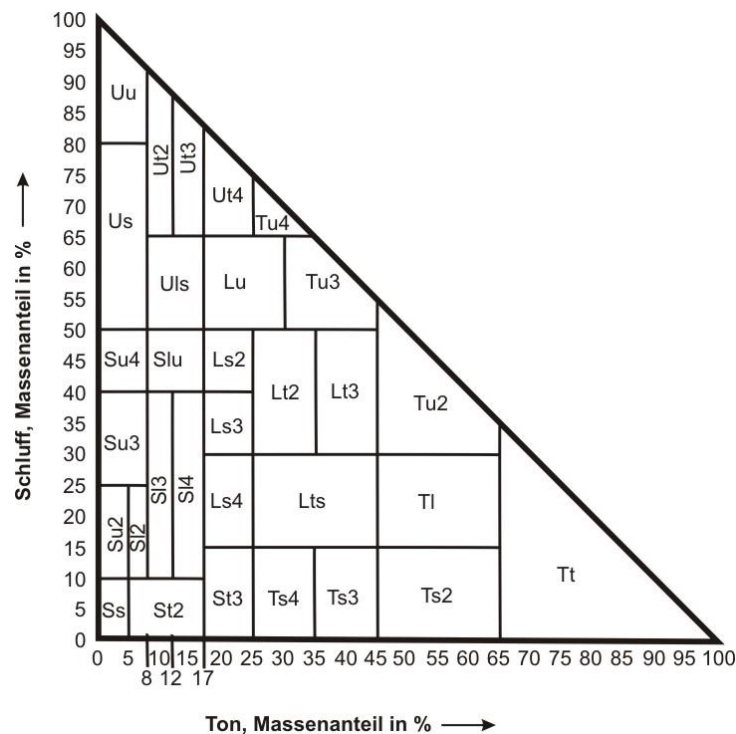


Abbildung 57: Feinbodenartendiagramm nach KA5 [AG Boden, 2005]

Sofern der prozentuale Anteil der Fraktionen Schluff und Ton bekannt ist, kann aus der Abbildung 57 die entsprechende Feinbodenart abgelesen werden. Das Feinbodenartendiagramm nach KA5 ist gemäß DIN 4220 [2008] die in Deutschland festgelegte Darstellungsform der Einteilung von Körnungsgemischen des Feinbodens.

Die Bodenartenuntergruppe reiner Sand (Ss) zeichnet sich durch unterschiedliche Eigenschaften in Bezug auf den Wasserhaushalt und die Erodierbarkeit aus. Deshalb wird Ss noch nach Fein-, Mittel- und Grobsandanteilen unterschieden. Da weder ein Fein-, Mittel- noch Grobsand als Rekultivierungsboden besonders geeignet ist, beziehen sich die weiteren Ausführungen ausschließlich auf den Ss [EGLOFFSTEIN et al., 2008; LANUV NRW, 2010].

Das Feinbodenartendiagramm bildet die Grundlage für das Instrumentarium zur Bewertung von Böden hinsichtlich Ihres Einsatzes als Rekultivierungsmaterial. Durch die Integration der nachfolgend beschriebenen Ebenen:

- nutzbare Feldkapazität,
- Durchwurzelung und
- Standsicherheit

lassen sich bessere Eignungsbewertungen für Böden ableiten. Die entsprechenden Ebenen können der Basis (Feinbodenartendiagramm) überlagert und die entsprechenden Größen in Abhängigkeit von der Körnungszusammensetzung und weiterer spezifischer Randbedingungen (z. B. Trockendichte) abgelesen werden.

Diese interdisziplinäre Modifizierung und Qualifizierung des Feinbodenartendreiecks erlaubt bereits im Rahmen der Bodenauswahl, die wesentlichen Komponenten bzgl. der

Funktionalität einer Wasserhaushaltsschicht zu berücksichtigen. Dies kann zu ökonomischen und ökologischen Vorteilen (z. B. Einsparung von Laborversuchen im Rahmen der Eignungsuntersuchung, Vermeidung von unnötigen Transportwegen für die Bereitstellung qualifizierten Bodens) im Rahmen der Eignungsuntersuchungen führen. Das bedeutet aber nicht, dass spezifische Versuche (Scherversuch, Ermittlung der pF-Kurve) für das ausgewählte Bodenmaterial im Zuge späterer Detailplanungen zur Oberflächenabdichtung wegfallen dürfen.

5.1.1 Ebene „Nutzbare Feldkapazität“

Für die Eignungsbeurteilung von potenziellen Rekultivierungsböden ist die Bewertung der nutzbaren Feldkapazität (nFK) von wesentlicher Bedeutung. Sie charakterisiert die Wassermenge (Vol.-%), die unter Ausschluss der Verdunstung vom Boden gegenüber der Gravitationskraft zurückgehalten werden kann, für Pflanzen zur Verfügung steht und eine maßgebliche Steuergröße des Bodenwasserhaushaltes darstellt [RENGER et al., 1974].

Rechnerisch stellt die nutzbare Feldkapazität die Differenz von Feldkapazität und permanenten Welkepunkt dar (Gl. 8):

$$nFK = FK - PWP \quad (8)$$

nFK ... nutzbare Feldkapazität [Vol.-%]; FK ... Feldkapazität [Vol.-%];

PWP ... permanenter Welkepunkt [Vol.-%]

Wird die nutzbare Feldkapazität mit der Mächtigkeit der Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht multipliziert, ergibt sich das pflanzenverfügbare Bodenwasser [mm]. Dabei muss berücksichtigt werden, dass eine Erhöhung der Mächtigkeit einer Wasserhaushalts-/Rekultivierungsschicht im Hinblick auf die Steigerung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers nur dann positiv wirkt, wenn der Boden auch ausreichend durchwurzelt wird. Dies belegen die Ergebnisse der Untersuchungen an der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz eindrucksvoll.

Für eine Vor-Ort-Einschätzung bzgl. der Nutzbarkeit des Bodenmaterials (auf der Basis des Rekultivierungsziels und der Flächengeometrie) wurde die nFK in Abhängigkeit von den Trockendichten als Erweiterungsebene zum Feinbodenartendiagramm nach KA5 abgeleitet. Die Anzahl der Unterebenen zur Ebene „nutzbaren Feldkapazität“ ist durch die Stufen der Trockendichten (gemäß DIN 4220 [2008], siehe Tabelle 25) limitiert.

Tabelle 25: Einstufung der Trockendichte nach DIN 4220 [2008]

Benennung	Trockendichte ρ_d	
	Kurzzeichen	[g/cm ³]
sehr gering	ρ_{d1}	$\rho_d < 1,2$
gering	ρ_{d2}	$1,2 \leq \rho_d < 1,4$
mittel	ρ_{d3}	$1,4 \leq \rho_d < 1,6$
hoch	ρ_{d4}	$1,6 \leq \rho_d < 1,8$
sehr hoch	ρ_{d5}	$\rho_d \geq 1,8$

Um eine Reduzierung der Unterebenen innerhalb der Ebene „nutzbare Feldkapazität“ zu erreichen, wurden ausgewählte Trockendichtestufen zu 3 Unterebenen zusammengefasst:

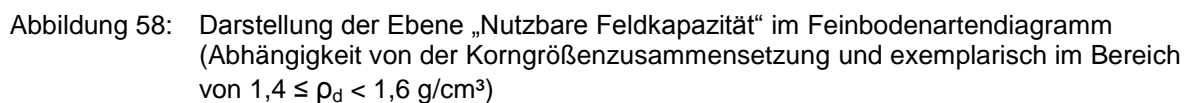
- $1,2 \leq \rho_d < 1,4 \text{ g/cm}^3$
- $1,4 \leq \rho_d < 1,6 \text{ g/cm}^3$
- $1,6 \leq \rho_d \leq 1,8 \text{ g/cm}^3$

Die Trockendichtestufe ρ_{d1} lässt sich in ρ_{d2} und die Stufe ρ_{d5} lässt sich in die Stufe ρ_{d4} integrieren. Der Einbau einer Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht mit einer Trockendichte $< 1,2 \text{ g/cm}^3$ (ρ_{d1}) ist unter Freilandbedingungen sowie unter Beachtung der großen Umsatzmengen (z. B. mehrere Hunderttausend m³ bei großtechnischen Deponiebaumaßnahmen) als unverhältnismäßig anzusehen. Die Realisierung von geringen Trockendichten ist beim Einbau nur mit hohem Aufwand erfüllbar und praktisch von geringer Bedeutung, da sie aufgrund des Setzungs- und Sackungspotenzials nicht dauerhaft gegeben sind. Des Weiteren ist die Qualitätsüberwachung solch geringer Dichten nur eingeschränkt möglich [GRUBERT & BEITH, 2009].

Ein Einbau bei einer Trockendichte $\geq 1,8 \text{ g/cm}^3$ ist u. a. unter Berücksichtigung der Durchwurzelung bzw. der zu erreichenden Durchwurzelungstiefe der Vegetation und der Bedeutung des Bewuchses für die Funktionalität einer Wasserhaushaltsschicht nicht sinnvoll. SÄNGER und WÖLLNER [1995] zeigen in ihren Ausführungen deutlich, dass das Wurzelwachstum ab einer Dichte von $1,8 \text{ g/cm}^3$ primär horizontal und nicht vertikal verläuft. Die Untersuchungen von HEINZE et al. [1995] sowie VEIHMEYER und HENDRICKSON [1948] und DANNOWSKI [1994] bestätigen diese Ergebnisse. Die Ursache liegt darin begründet, dass bei unplastischen Böden die Bodenporengröße das Wurzelwachstum hemmt, da die Widerstandskraft des Bodengerüsts die Penetrationskraft der Wurzel übersteigt [POLOMSKI & KUHN, 1998]. Sind Wurzelsperren zum Schutz tieferliegender Abdichtungssystemkomponenten notwendig, so ist es durchaus sinnvoll die unterste Lage einer Wasserhaushaltsschicht mit einer Trockendichte von $\geq 1,8 \text{ g/cm}^3$ einzubauen.

Für Detailplanungen sind DIN-gerechte Laborversuche (DIN ISO 11274 [2011]) zur Ermittlung der pF-Kurve durchzuführen. Eine Bewertung des bodenspezifischen

Da ein konkreter nFK-Wert (wie in KA 5 [AG BODEN, 2005] bzw. DIN 4220 [2008] ausgewiesen) für die Beurteilung und Bewertung des Wasserrückhaltevermögens eines Bodens nicht als zweckmäßig angesehen werden kann und sich u. a. aufgrund von Inhomogenitäten im Material unterschiedliche nFK-Werte über das Gesamtvolumen des Bodens ergeben, werden Wertebereiche (nFK1 bis nFK5 → laut DIN 4220 [2008]) realisiert (Abbildung 58).



Mit Hilfe der Ebene „Nutzbare Feldkapazität“ ist in Abhängigkeit von der Trockendichte für die einzelne Feinbodenart der entsprechende Bereich des pflanzenverfügbaren Bodenwassers ablesbar. Unter Berücksichtigung der Durchwurzelungstiefe sind Abschätzungen zur Dimensionierung einer Wasserhaushaltsschicht realisierbar.

5.1.2 Ebene „Durchwurzelung“

Die Deponieverordnung aus dem Jahre 2009 sowie Empfehlungen ausgewiesener Fachkreise (z. B. GDA-Empfehlungen) formulieren entsprechende Anforderungen an die Rekultivierungsschicht. Minimale Absickerungsraten aus der Rekultivierungsschicht sind nur zu erreichen, wenn das Wasserrückhaltevermögen hoch ist und durch den Bewuchs eine tiefreichende und intensive Durchwurzelung der Schicht erreicht wird. Dies sind Voraussetzungen für eine hohe Verdunstung und damit einer Minimierung der Absickerungsraten.

Die Ausbildung des verdunstungsbeeinflussten Bereichs durch die Vegetation ist neben dem Wasserspeichervermögen des Bodens für die Quantifizierung des Bodenwasserhaushalts von Bedeutung. In diesem Zusammenhang wird in der KA5 standardmäßig der Begriff effektive Durchwurzelungstiefe (DWT_{eff}) verwendet [AG BODEN, 2005]. Diese kennzeichnet die potenzielle Ausschöptiefe von pflanzenverfügbarem Bodenwasser, das dem Boden durch einjährige landwirtschaftliche Nutzpflanzen in Trockenjahren maximal entzogen werden kann [AG BODEN, 2005]. Die effektive Durchwurzelungstiefe ist diejenige Tiefe, in der der bereits ausgeschöpfte Bodenwasservorrat (schraffierte Fläche in Abbildung 59) gleich dem noch durch Pflanzen ausschöpfbaren Wasservorrat ist [DUNGER, 2007]. Der Grundwassereinfluss bleibt hierbei unberücksichtigt.

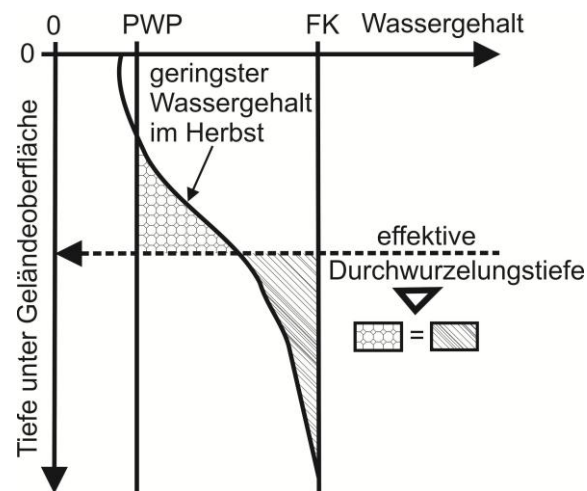


Abbildung 59: Methodischer Ansatz zur Ermittlung der effektiven Durchwurzelungstiefe [DUNGER, 2007, verändert]

Unter Beachtung, dass für jede Pflanzenart ein spezifisches Wurzelwachstum charakteristisch ist und damit bei gleicher Körnung lediglich eine generelle Reihung (Grünland < Ackerland < Wald) aufgestellt werden kann, ist es nach BLUME et al. [2011] möglich, für Getreide (in der norddeutschen Klimaregion) ein bodenartenspezifischen mittleren effektiven Wurzelraum (Wzr_{eff}) anzugeben (Tabelle 26).

Tabelle 26: Mittlerer effektiver Wurzelraum ($W_{zr_{eff}}$) und pflanzenverfügbare Bodenwassermenge (w_{pfl}) bei mittlerer Lagerungsdichte und in Abhängigkeit von der Bodenart für Getreide im Norddeutschen Tiefland [BLUME et al., 2011]

Bodenart	$W_{zr_{eff}}$ [dm]	w_{pfl} [mm]
Grobsand	5	30
Mittelsand	6	55
Feinsand	7	80
lehmiger Sand	7	115
schluffiger Sand	8	140
lehmiger Schluff	11	220
sandiger lehm	9	155
schluffiger Lehm	10	190
toniger Lehm	10	165
lehmiger und schluffiger Ton	10	140

Die Datenbasis für die Erstellung der Ebene „Durchwurzelung“ und der entsprechenden Unterebenen:

- Gras-/Kräutermischung,
- Sträucher und
- Bäume

wird durch die konkreten Versuchsergebnisse der Untersuchungen auf der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz und eine umfangreiche Literaturrecherche geschaffen. Da die Ausbildung der Wurzelcharakteristik jeder Pflanze u. a. von den regionalen Standortfaktoren (z. B. Klima) abhängt, werden auch Werte aus publizierten Forschungsergebnissen involviert, die aus mitteleuropäischen Untersuchungsgebieten stammen. Dadurch waren näherungsweise ähnliche natürliche Randbedingungen gegeben. Alle Angaben zu den Durchwurzelungstiefen sind als Orientierungswerte zu verstehen, da die Wurzelcharakteristik sehr stark von den lokalen Bedingungen sowie den anthropogenen Einflüssen abhängt [WEAVER, 1926].

Für die Anwendung der Ebene „Durchwurzelung“ gelten folgende Randbedingungen:

- keine Berücksichtigung von Samen, der bereits im Boden vorhanden ist
- keine Berücksichtigung von zusätzlich eingetragenen Samen (z. B. Windanflug, Antransport durch Vögel)
- keine Berücksichtigung von natürlichen (z. B. Sukzession, ökologische Konkurrenz) und anthropogenen (z. B. Mahd, Bodenverdichtung durch Verkehrslasten) Einflüssen, die zu einer zeitlichen Veränderung der Vegetationsentwicklung führen
- keine Berücksichtigung des Standortes „Deponie“ (ggf. Einfluss von CH_4 , Wärme)

Wie bei der Ebene „nutzbare Feldkapazität“ ist es sinnvoll, Bereiche für maximale Durchwurzelungstiefen anzugeben. Da es keinen Bewuchs gibt, der alle Bedingungen auf dem Standort „Deponie“ erfüllt und für jede Rekultivierungsfläche optimal geeignet wäre,

kommen je nach standortspezifischem Klima, Geländemorphologie, verfügbarem Rekultivierungsboden und geplanter Folgenutzung (Nachsorge) unterschiedliche Pflanzengemeinschaften in Frage. Gleichfalls ist zu berücksichtigen, welche Vegetation aus naturschutzfachlichen und landschaftspflegerischen Gesichtspunkten sowie unter dem Aspekt der potenziellen natürlichen Vegetation (PNV) ausgewählt werden sollte. Unter der PNV versteht man den Zustand der Vegetation, der in einem Gebiet unter den gegenwärtigen Umweltbedingungen vorherrschen würde, wenn der Mensch nicht mehr eingreift und die Vegetation sich bis zu ihrem Endzustand entwickeln könnte [BOHN & WELSS, 2003]. Es ist aber immer davon auszugehen, dass Pflanzen aus Saatgutmischungen oft schon nach kurzer Zeit von spontan aufgekommenen Arten verdrängt werden.

Die Pflanzen, welche im Rahmen der Ebene „Durchwurzelung“ berücksichtigt sind, resultieren aus Empfehlungen ausgewiesener Expertenkreise (z. B. GDA, FLL), verschiedenen Saatgutherstellern, Wissenschaftlern sowie staatlicher Untersuchungsanstalten (z. B. Sächsisches Staatministerium für Umwelt und Landwirtschaft in Kooperation mit dem Deutschen Verband für Landschaftspflege, Thüringer Lehr- und Versuchsanstalt Gartenbau). In der Literatur sind Untersuchungen zu verschiedenen Saatgutmischungen (Gras- / Kräuter) verfügbar, wovon 29 Mischungen (Anlage 2) für die Ebene „Durchwurzelung“ verwendet wurden. In Tabelle 27 sind die Saatgutmischungen aufgezeigt, die die Unterebene „Gras- / Kräutermischung“ charakterisieren.

Tabelle 27: Verwendete Gras-/Kräutermischungen für die Ebene „Durchwurzelung“

Benennung im Dreieck	Bezeichnung	Besonderheit	Quelle
A	Straßenbegleitgrün Nord 2010-11	-	RIEGER-HOFFMANN.de, 2010
B	Straßenbegleitgrün Süd 2010-11	-	RIEGER-HOFFMANN.de, 2010
C	Saatgutmischung für Mülldeponien	trockener, saurer, stickstoffarmer Standort	WILKE, 2010
D	Gras-Kräutermischung	mittel- und ostdeutsches Hügelland	MARZINI, 2005; REIDENBACH, 2008
E	Regelsaatgutmischung nach FLL (50% RSM 7.2.1 und 50% RSM 7.2.2)	Trockenlage ohne Kräuter	MARZINI, 2005; REIDENBACH, 2008
F	Regelsaatgutmischung nach FLL (50% RSM 7.1.1 und 50% RSM 7.1.2)	Standard ohne Kräuter	MARZINI, 2005; REIDENBACH, 2008
G	Freudenberger GF 711	Standard ohne Kräuter – RSM 7.1.1	FREUDENBERGER.net, 2010
H	Freudenberger GF 712	Standard mit Kräuter – RSM 7.1.2	FREUDENBERGER.net, 2010
I	Freudenberger GF 721	Trockenlagen ohne Kräuter – RSM 7.2.1	FREUDENBERGER.net, 2010

Benennung im Dreieck	Bezeichnung	Besonderheit	Quelle
J	Freudenberger GF 722	Trockenlagen mit Kräuter – RSM 7.2.2	FREUDENBERGER.net, 2010
K	Freudenberger GF 740	Halbschatten – RSM 7.4	FREUDENBERGER.net, 2010
L	Freudenberger GF 840	Extensivrasen	FREUDENBERGER.net, 2010
M	Freudenberger GF 890	Mulden und Rigolen	FREUDENBERGER.net, 2010
N	Freudenberger GL 815	Böschungsrassen mit Klee	FREUDENBERGER.net, 2010
O	Freudenberger GL 817	Böschungsrassen ohne Klee	FREUDENBERGER.net, 2010
P	QG2 Wiese	frische bis feuchte und wechselfeuchte Standorte	SMUL.de, 2010
Q	Saatgutmischung für Mülldeponien	frischer, mäßig saurer, stickstoffarmer Standort	WILKE, 2010
R	Magerrasen 2010-11; Nr. 3	Herkunft 7	RIEGER-HOFFMANN.de, 2010
S	Magerrasen 2010-11; Nr. 3	Herkunft 8	RIEGER-HOFFMANN.de, 2010
T	QG7 Wiese	frische bis trockenere Standorte	SMUL.de, 2010
U	QG3 Wiese	Höhenlagen	SMUL.de, 2010
V	Saatgutmischung für Mülldeponien	frischer, mäßig basischer, stickstoffreicher Standort	WILKE, 2010
W	Freudenberger GL	Begrünungsmischung	FREUDENBERGER.net, 2010
X	Magerrasen 2010-11; Nr. 3	Herkunft 3	RIEGER-HOFFMANN.de, 2010
Y	QG1 Wiese	mäßig trockener Standort	SMUL.de, 2010
Z	Magerrasen 2010-11; Nr. 3	Herkunft 4	RIEGER-HOFFMANN.de, 2010
AA	Deponiebegrünungsmischung	Kräuter ohne aggressive Tiefwurzler	SAATEN-ZELLER.de, 2010
AB	Saatgutmischung für Bodenaufschlüsse und Bodenverbesserungen	schwach saurer bis basischer Standort	WILKE, 2010
AC	Saatgutmischung für Mülldeponien	trockener, basischer, stickstoffarmer Standort	WILKE, 2010

Da die Saatgutmischungen teilweise ein sehr breites Artenspektrum haben, wurden für die feinbodenartenspezifische Charakterisierung der Durchwurzelung die prozentual am stärksten vertretenen Arten herangezogen. Kommen spezifische Tiefwurzler in den Saatgutmischungen vor, so sind diese auf der entsprechenden Unterebene vermerkt. Im Ergebnis der Recherchen zu den feinbodenartenspezifischen Durchwurzelungstiefen

[KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 1982; REYNOLDS & LESLIE, 1989; BRAUN et al., 2009] der o. g. Saatgutmischungen (Gras- / Kräuter) lassen sich folgende Pflanzenarten ausweisen (Tabelle 28), die am häufigsten in den Mischungen vertreten sind.

Tabelle 28: Durchwurzelungstiefen und ausgewählte Zeigerwerte nach ELLENBERGER et al. [1992] der Pflanzen, die am häufigsten in den Saatgutmischungen vorkommen

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname	Wurzeltiefe [cm] in Abhängigkeit von der Bodenart				Zeigerwerte ELLENBERGER et al. [1992]		Absolute Häufigkeit des Vorkommens in den Mischungen (Σ 29)
		S	L	U	T	K	F	
<i>Agrostis capillaris</i>	Rotes Straußgras	-	70	-	-	3	X	13
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	Gewöhnliches Ruchgras	15	50	-	-	X	X	7
<i>Bromus erectus</i>	Aufrechte Trefe	90	-	-	-	2	3	14
<i>Campanula rotundifolia</i>	Rundblättrige Glockenblume	60	70	-	120	X	X	7
<i>Centaurea scabiosa</i>	Skabiosen-Flockenblume	160	-	-	100	3	3	8
<i>Cynosurus cristatus</i>	Wiesen-Kammgras	20	20	20	20	3	5	6
<i>Dactylis glomerata</i>	Wiesen-Knäuelgras	80	-	100	-	3	5	6
<i>Daucus carota</i>	Wilde Möhre	-	60	120	-	5	4	10
<i>Festuca ovina</i>	Schaf-Schwingel	20	10	10	10	3	X	14
<i>Festuca pratensis</i>	Wiesen-Schwingel	-	70	140	90	3	6	5
<i>Festuca rubra</i>	Gewöhnlicher Rot-Schwingel	60	55	45	45	5	6	21
<i>Lolium perenne</i>	Deutsches Weidelgras	100	-	75	-	3	5	14
<i>Lotus corniculatus</i>	Gewöhnlicher Hornklee	-	-	110	120	3	4	7
<i>Medicago sativa</i>	Saat-Luzerne	-	400	400	400	6	4	2
<i>Phleum pratense</i>	Wiesen-Lieschgras	50	80	90	-	5	5	5
<i>Pimpinella saxifraga</i>	Kleine Bibernelle	85	80	270	-	5	3	6
<i>Plantago lanceolata</i>	Spitzwegerich	-	60	70	60	3	X	8
<i>Poa pratensis</i>	Wiesen-Rispengras	40	-	40	-	X	5	16

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname	Wurzeltiefe [cm] in Abhängigkeit von der Bodenart				Zeigerwerte ELLENBERGER et al. [1992]		Absolute Häufigkeit des Vorkommens in den Mischungen (Σ 29)
		S	L	U	T	K	F	
<i>Rumex acetosa</i>	Wiesen-Sauerampfer	150	-	40	-	X	X	3
<i>Salvia pratensis</i>	Wiesen-Salbei	95	-	-	85	4	3	10
<i>Sanguisorba minor</i>	Kleiner Wiesenknopf	-	200	200	150	5	3	14
<i>Trifolium pratense</i>	Rot-Klee	-	-	50	100	3	5	7
<i>Trifolium repens</i>	Weiß-Klee	-	-	60	-	X	5	6

- ... keine Daten verfügbar; X ... ungleiches Verhalten der Pflanzen in unterschiedlichen Gebieten

Die Zeigerwerte Kontinentalitätszahl (K) und Feuchtezahl (F) nach ELLENBERGER et al. [1992] können ganzzahlige Werte zwischen 1 und 9 annehmen und sind ausschließlich für die in Tabelle 28 aufgelisteten Arten mit aufgeführt. Sie charakterisieren Standortgegebenheiten, unter denen die Pflanzen am konkurrenzstärksten sind. Für die Auswahl der Vegetation zur Begrünung der Rekultivierungsfläche sind die o. g. Zeigerwerte sinnvolle Ergänzungen. Mit Hilfe der Feuchtigkeitszahl kann festgestellt werden, ob die ausgewählten Pflanzenarten mit möglicherweise auftretenden Phasen von Staunässe zurechtkommen. Die Kontinentalitätszahl charakterisiert das Vorkommen der Pflanzen im Kontinentalitätsgefälle von der Atlantikküste bis ins innere Asien. Dies ist im Besonderen unter dem Aspekt der Temperaturschwankungen und der Feuchteverteilung bei der Pflanzenauswahl zu berücksichtigen. Die in Tabelle 28 aufgezeigten Feuchtigkeits- und Kontinentalitätszahlen nach ELLENBERGER et al. [1992] besitzen auszugsweise folgende Bedeutung:

- Kontinentalitätszahl (K): 1 → euozanisch, in Mitteleuropa nur mit wenigen Vorposten
9 → eukontinental, im westlichen Mitteleuropa fehlend und im östlichen selten
- Feuchtigkeitszahl (F): 1 → Starktrockniszeiger, an oftmals austrocknenden Stellen lebensfähig und auf trockene Böden beschränkt
9 → Nässezeiger, Schwergewicht auf oft durchnässten (luftarme) Böden

Die vollständige Charakterisierung der K- und F-Zahlen sowie die detaillierte Methodik bzgl. des Umgangs mit den Zeigerwerten sowie die weiteren Bedeutungen der hier nicht genannten K- und F-Zahlen ist in ELLENBERGER et al. [1992] beschrieben. In Abbildung 60 ist

exemplarisch die Unterebene „Durchwurzelung“ für eine ausgewählte Saatgutmischung aus der Tabelle 27 dargestellt. Die weiteren Unterebenen sind in Anlage 3.2 dargestellt.

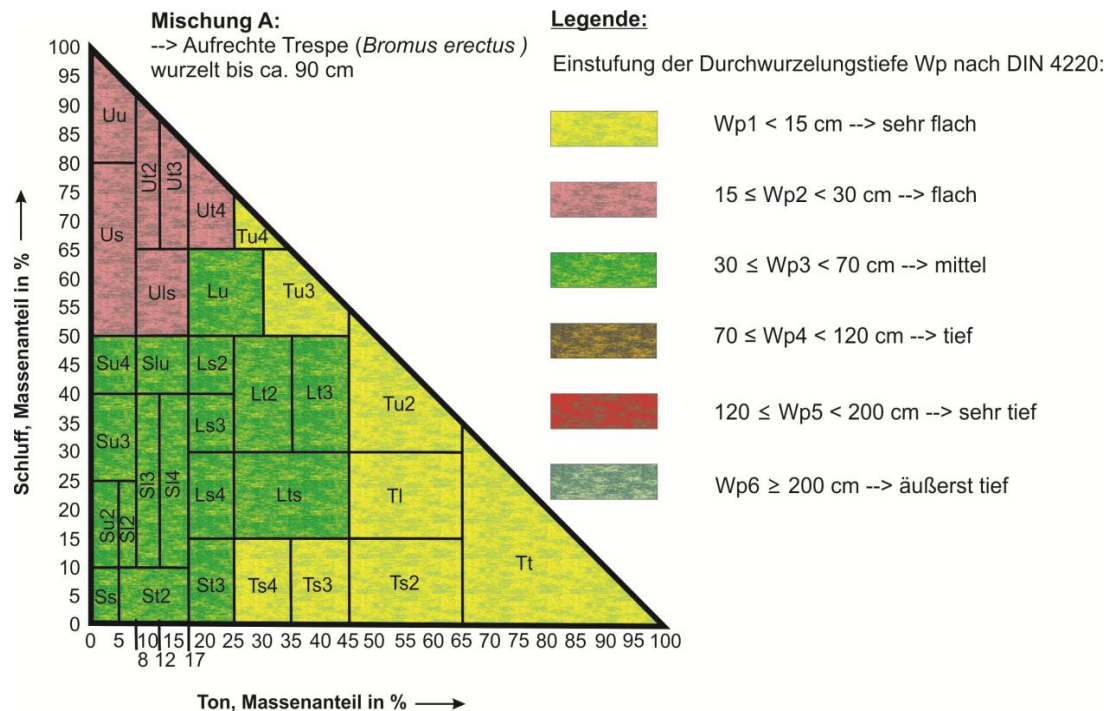


Abbildung 60: Ebene „Durchwurzelung“ für die Gras-/Kräuter-Saatgutmischung A - Klassifizierung der Durchwurzelungstiefe W_p in Abhängigkeit von der Feinbodenart

Neben den Gras-/Kräutermischungen haben sich in den letzten Jahren auch die Bewuchsformen „Bäume“ und „Sträucher“ als Rekultivierungsbegrünung etabliert. Außer einer höheren Verdunstung liefern sie auch einen größeren Beitrag zur Böschungsstabilisierung (z. B. durch höhere Zugfestigkeitsbereiche) als Gräser und Kräuter.

Die Untersuchungsergebnisse von KATZENBACH und WERNER [2007] sowie SCHUPPENER [1993] machen deutlich, wie die Pflanzenwurzeln als Bodenarmierung wirken und dadurch Scher- und Zugspannungen aufnehmen können. Bestätigt werden diese Ergebnisse u. a. durch die Untersuchungen von KONOLD et al. [2005], REUBENS et al. [2007] und SCHAARSCHMIDT [1974].

Wenn größere Wassermengen über die Pflanzen verdunstet werden sollen, ist ein mehrstufiger Vegetationsbestand (in Abhängigkeit von den natürlichen Randbedingungen) am effektivsten [SCHMEISKY & HOFMANN, 2002; HEILMEIER & SCHROIFF, 2009]. MITSCHERLICH [1981] macht anhand seiner Untersuchungen deutlich, dass ein Nadelwald (u. a. in Abhängigkeit vom Niederschlag und der Globalstrahlung) regionalspezifisch mühelos den kompletten Jahresniederschlag verdunsten kann.

Insgesamt wurden 86 Baum- und Straucharten hinsichtlich ihrer feinbodenartenspezifischen Durchwurzelungstiefen betrachtet. Zur Erarbeitung der Unterebenen „Nadelbäume“, „Laubbäume“ und „Sträucher“ sind 46 Arten berücksichtigt worden. Ausschlusskriterien waren u. a. die vorhandene Datengrundlage und die Frage des natürlichen Vorkommens der

entsprechenden Baum- oder Strauchart. Es wurden nur einheimische bzw. seit längerer Zeit in Deutschland angepflanzte bzw. etablierte Gehölze involviert.

In Tabelle 29 sind die verwendeten Arten für die Unterebene „Sträucher“ mit ihren feinbodenartenspezifischen Durchwurzelungstiefen und den Zeigerwerten (F und K) nach ELLENBERGER et al. [1992] aufgelistet.

Tabelle 29: Durchwurzelungstiefen und ausgewählte Zeigerwerte nach ELLENBERGER et al. [1992] für betrachtete Straucharten

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname	Wurzeltiefe [cm] in Abhängigkeit von der Bodenart			Zeigerwerte ELLENBERGER et al. [1992]	
		S	L	U + T	K	F
<i>Berberis vulgaris</i>	Berberitze	170	280	-	4	4
<i>Corylus avellana</i>	Haselstrauch	-	190	150	3	X
<i>Crataegus monogyna</i>	eingrifflicher Weißdorn	300	80	-	3	4
<i>Euonymus europaeus</i>	Europäisches Pfaffenhütchen	75	-	-	3	5
<i>Juniperus communis</i>	Gewöhnlicher Wacholder	300	200	-	X	4
<i>Prunus spinosa</i>	Schlehe	-	150	-	5	4
<i>Rhamnus catharticus</i>	Purgier-Kreuzdorn	-	100	-	5	4
<i>Sambucus nigra</i>	Schwarzer Holunder	300	-	-	3	5
<i>Sambucus racemosa</i>	Traubenholunder	-	-	180	4	5
<i>Viburnum lantana</i>	Wolliger Schneeball	100	140	-	2	4
<i>Viburnum opulus</i>	Gemeiner Schneeball	70	-	65	3	X

- ... keine Daten verfügbar; X ... ungleiches Verhalten der Pflanzen in unterschiedlichen Gebieten

Die Durchwurzelungstiefen gelten für ausgewachsene Individuen.

Aus Tabelle 29 und Abbildung 61 wird deutlich, dass bereits bei Verwendung des Bewuchses „Sträucher“ mit deutlich tieferen Durchwurzelungen zu rechnen ist.

Bodenmächtigkeiten von mindestens 2,0 m sind Voraussetzung bei der Nutzung von Sträuchern als Bewuchs. Häufig wird auch eine Kombination aus Bäumen und Sträuchern verwendet.

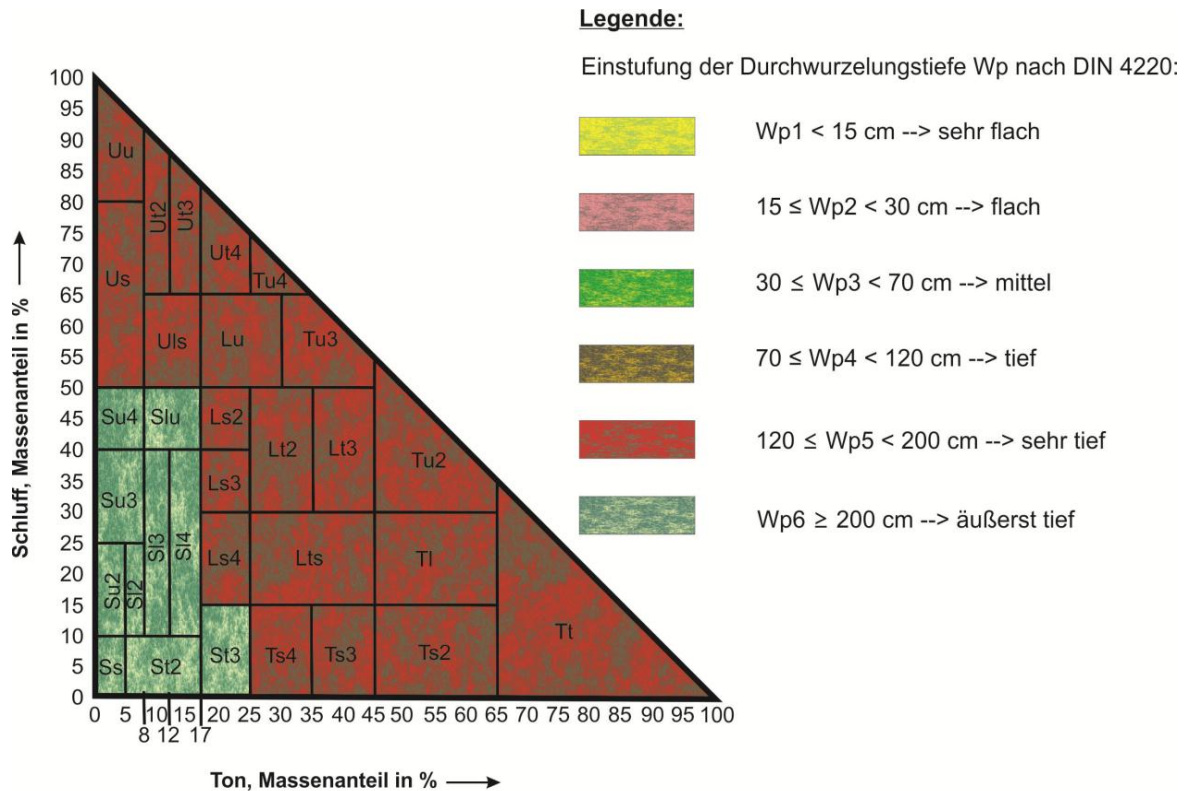


Abbildung 61: Ebene „Durchwurzelung“ für die Straucharten – Klassifizierung der Durchwurzelungstiefe W_p in Abhängigkeit von der Feinbodenart

In Abhängigkeit von der Art der Pflanze variieren die Durchwurzelungstiefe und -intensität. Vor allem Gehölze bilden artspezifische markante Wurzelsysteme aus. Aufgrund von standörtlichen Gegebenheiten (Bodenart, -mächtigkeit, Grundwasserbeeinflussung, etc.) kann es auch Übergänge zwischen einzelnen Typen geben. Bei den Wurzelsystemen unterscheidet man 3 grundsätzliche Arten [SCHMEISKY & HOFMANN, 2005; LYR et al., 1992]:

- Flachwurzler → breiten sich in den obersten Dezimetern aus und bilden aus ihren horizontal verlaufenden Hauptwurzeln Senkerwurzeln in die Tiefe aus
- Herzwurzler → besitzen einige Hauptwurzeln bis in mittlere Tiefen, von denen horizontal abgehende Seitenwurzeln wachsen
- Pfahlwurzler → können mit ihrer Hauptwurzel (an der sich horizontale Seitenwurzeln bilden) in die tiefsten durchwurzelbaren Bodenschichten vordringen

Um Schäden am Entwässerungs- und Dichtungssystem zu vermeiden, sollte eine Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht (mit dem Rekultivierungsziel „Wald“) eine Mindestmächtigkeit von 2,5 m aufweisen. Ein entsprechender Durchwurzelungsschutz (z. B. in Form einer stark verdichteten Bodenschicht mit $\rho_d \geq 1,8 \text{ g/cm}^3$) stellt eine sinnvolle Sicherung dar.

Untersuchungen an ausgewachsenen Baumbeständen, die durch Sturmwurf beschädigt wurden, zeigen ausgehebelte Wurzelballen (inkl. dem dadurch geschädigten Bodenbereich) von 1,5 - 2 m [ALDINGER et al., 1996].

Neben der Artspezifität des Baumes spielen bzgl. der Wurzelentwicklung vor allem die bodenphysikalischen Eigenschaften (z. B. Körnung, Dichte) sowie der pH-Wert und das Nährstoffangebot eine entscheidende Rolle.

Untersuchungen von BACHMANN & BOHNE [1999] zeigen, dass vor allem Feldahorn, Liguster und Weidenarten sich besonders für Deponiebegrünungen eignen. Aufgrund des sehr guten Regenerationsvermögens (Stockausschlag) sind auch Erlen zur Deponiebegrünung zu empfehlen. Sofern Robinien als Begrünungsart vorgesehen sind, muss beachtet werden, dass aufgrund des flach ausgebildeten Wurzelsystems mit Schäden durch Windbruch zu rechnen ist [BACHMANN & BOHNE, 1999].

Da es auch beim Bewuchs „Wald“ keine allgemein gültige Empfehlung für die Baumarten gibt und diese sehr stark von den lokalen und regionalen Bedingungen und Voraussetzungen abhängen [ROTHSTEIN, 1995], wurden sieben potenziell mögliche Nadelbaumarten (Tabelle 30) und 25 Laubbaumarten (Tabelle 31) betrachtet.

Die in der Tabelle 30 und Tabelle 31 aufgelisteten Durchwurzelungstiefen [POLOMSKI & KUHN, 1998; KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002; KUHR, 1999; SINN, 1982; LEHNARDT & BRECHTEL, 1980] gelten für adulte Bäume (> 30 a).

Tabelle 30: Durchwurzelungstiefen und ausgewählte Zeigerwerte nach ELLENBERGER et al. [1992] für die betrachteten Nadelgehölze

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname	Wurzeltiefe [cm] in Abhängigkeit von der Bodenart				Zeigerwerte ELLENBERGER et al. [1992]	
		S	L	U	T	K	F
<i>Abies alba</i>	Weiß-Tanne	120	200	150	100	4	X
<i>Larix decidua</i>	europäische Lärche	200	150	160	120	6	4
<i>Picea abies</i>	Fichte	200	150	400	200	6	X
<i>Pinus silvestris</i>	Gemeine Kiefer	600	350	300	100	7	X
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Douglasie	300	150	200	-	-	-
<i>Sorbus aucuparia</i>	Eberesche	-	200	200	-	X	X
<i>Taxus baccata</i>	Gemeine Eibe	165	-	-	-	2	5

- ... keine Daten verfügbar; X ... ungleiches Verhalten der Pflanzen in unterschiedlichen Gebieten

Tabelle 31: Durchwurzelungstiefen und ausgewählte Zeigerwerte nach ELLENBERGER et al. [1992] für die betrachteten Laubgehölze

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname	Wurzeltiefe [cm] in Abhängigkeit von der Bodenart				Zeigerwerte ELLENBERGER et al. [1992]	
		S	L	U	T	K	F
<i>Acer campestre</i>	Feld-Ahorn	350	-	-	-	4	5
<i>Acer platanoides</i>	Spitzahorn	280	-	-	-	4	X
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Bergahorn	150	120	250	50	4	6
<i>Alnus glutinosa</i>	Schwarzerle	360	180	190	220	3	9=
<i>Alnus incana</i>	Grauerle	200	70	60	-	4	7=
<i>Alnus viridis</i>	Grünerle	-	250	-	-	4	6
<i>Betula pendula</i>	Sandbirke	400	150	150	130	X	X
<i>Carpinus betulus</i>	Hainbuche	200	130	140	120	4	X
<i>Fagus silvatica</i>	Rotbuche	300	180	200	90	2	5
<i>Fraxinus excelsior</i>	Gemeine Esche	200	150	150	-	3	X
<i>Populus alba</i>	Silber-Pappel	260	-	140	-	7	7~
<i>Populus nigra</i>	Schwarz-Pappel	260	-	140	-	6	8=
<i>Populus tremula</i>	Zitterpappel	260	-	140	-	5	5
<i>Populus x canescens</i>	Grau-Pappel	260	-	140	-	-	-
<i>Prunus padus</i>	Traubenkirsche	140	-	-	-	3	8=
<i>Quercus petraea</i>	Traubeneiche	150	200	400	120	5	2
<i>Quercus robur</i>	Säulen/Stiel-Eiche	150	200	400	120	6	X
<i>Robinia pseudoacacia</i>	Robinie	300	280	220	-	4	4
<i>Salix alba</i>	Silberweide	300	-	-	-	6	8=
<i>Salix caprea</i>	Salweide	250	-	-	-	3	6
<i>Sorbus aria</i>	Mehlbeere	200	-	-	-	2	4
<i>Tilia cordata</i>	Winter-Linde	200	130	130	-	4	5
<i>Ulmus minor</i>	Feld-Ulme	-	-	350	50	5	X~
<i>Ulmus montana</i>	Bergulme	-	150	150	150	-	-

- ... keine Daten verfügbar; X ... ungleiches Verhalten der Pflanzen in unterschiedlichen Gebieten

= ... regelmäßig auf überschwemmten Böden vorkommend;

~ ... starker Wechsel (z. B. Wechselfeuchte, Wechsel trockenheit)

Auf Deponieabdeckungen können die Pflanzenarten teilweise deutlich größere Durchwurzelungstiefen, als in der Literatur beschrieben, erreichen [MELCHIOR, 1993; MELCHIOR, 1997; MAIER-HARTH & MELCHIOR, 2001]. Im Rahmen der Dimensionierung der Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht ist dies zu berücksichtigen. Eventuell notwendige Erhöhungen der Schichtmächtigkeit sind im Zusammenhang mit der nutzbaren

Feldkapazität und der veränderten Standsicherheit zu optimieren. In den Abbildung 62 und Abbildung 63 sind die Unterebenen „Nadelbäume“ und „Laubbäume“ verdeutlicht.

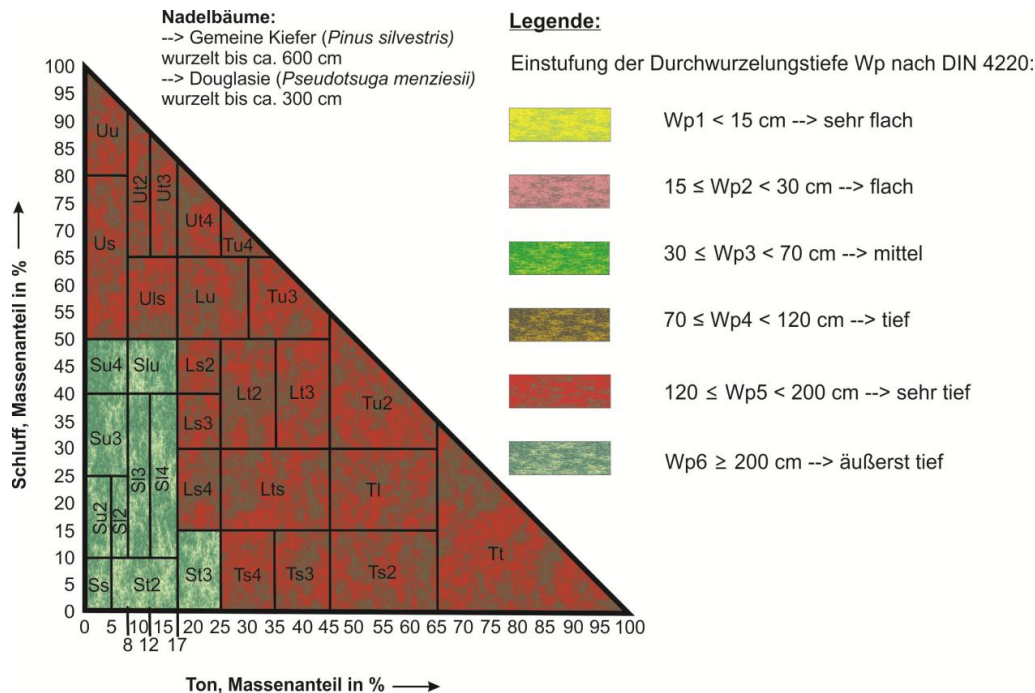
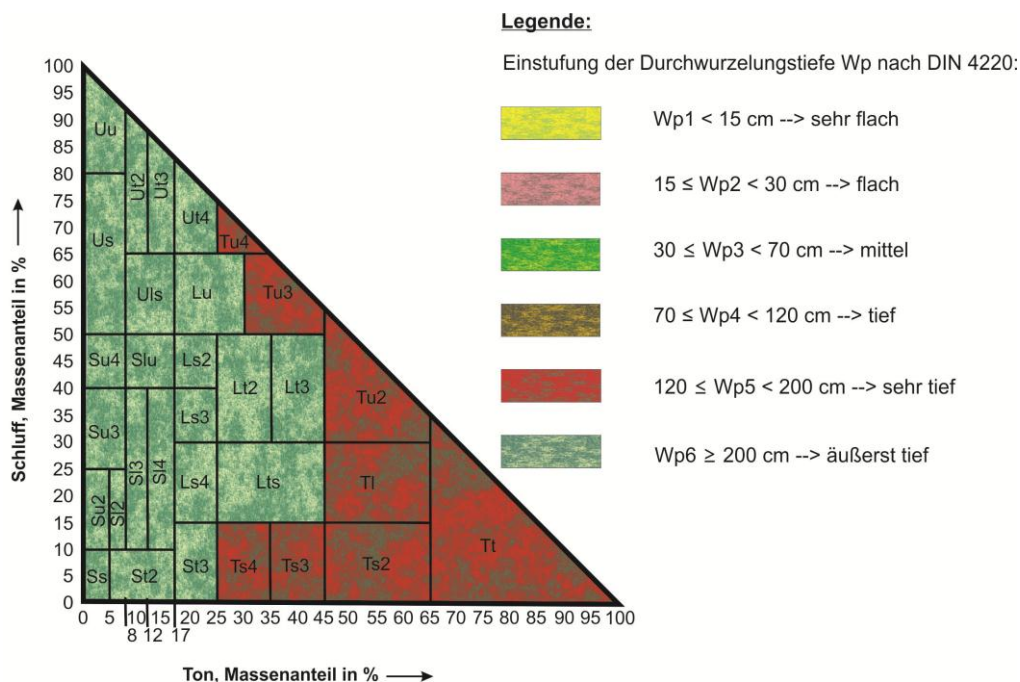


Abbildung 62: Ebene „Durchwurzelung“ für den Bewuchs „Nadelbaum“ – Klassifizierung der Durchwurzelungstiefe W_p in Abhängigkeit von der Feinbodenart



Laubbäume:

- > Ahorn (*Acer sp.*) wurzelt bis ca. 350 cm
- > Erle (*Alnus sp.*) wurzelt bis ca. 360 cm
- > Sandbirke (*Betula pendula*) wurzelt bis ca. 400 cm
- > Rotbuche (*Fagus silvatica*) wurzelt bis ca. 300 cm
- > Pappel (*Populus sp.*) wurzelt bis ca. 260 cm
- > Eiche (*Quercus sp.*) wurzelt bis ca. 400 cm
- > Robinie (*Robinia pseudoacacia*) wurzelt bis ca. 300 cm
- > Weide (*Salix sp.*) wurzelt bis ca. 300 cm
- > Ulme (*Alnus sp.*) wurzelt bis ca. 350 cm

Abbildung 63: Ebene „Durchwurzelung“ für den Bewuchs „Laubbaum“ – Klassifizierung der Durchwurzelungstiefe W_p in Abhängigkeit von der Feinbodenart

Die Abbildung 62 und die Abbildung 63 verdeutlichen, dass für einen Baumbewuchs eine wesentlich größere Schichtmächtigkeit der Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht erforderlich ist. Wurzeltiefen von bis zu 4,0 m sind zu erwarten. Derartige Wurzeltiefen werden aber erst nach mehreren Jahren erreicht [MAIER-HARTH, 2009]. Dementsprechend entwickeln sich auch erst im Laufe der Zeit die hohen Transpirationsleistungen der Baumbestände. HEINKELE [2009] verdeutlicht dies an langjährigen Untersuchungen auf Kippen im Lausitzer Braunkohlerevier.

Nach einer forstlichen Rekultivierung von Wasserhaushaltsschichten ist erst nach 15 bis 30 Jahren mit der standortspezifischen maximalen Wurzelentwicklung zu rechnen [SCHABER-SCHOOR, 2005; HEINKELE, 2009].

5.1.3 Ebene „Standsicherheit“

Mechanische Eigenschaften, Verformbarkeiten und Scherfestigkeiten des Rekultivierungsbodens sowie der gewählte Schichtaufbau bestimmen die kurz- und langfristige Standsicherheit einer Wasserhaushaltsschicht [KÖLSCH, 2000]. Natürliche und anthropogene Einflüsse (z. B. Klima, Deponiekörperdeformationen) haben Auswirkungen auf die Standsicherheit des gesamten Oberflächenabdichtungssystems [BRIANCON et al., 2002; DEHN et al., 2000]. Nachfolgend genannte Versagensarten können bei Oberflächenabdichtungssystemen auftreten [WUDTKE et al., 2008; SCHNEIDER et al., 2010]:

- Erosion und Verflüssigung
- Kriechdeformation
- Rutschungen (plötzliches Versagen durch ebenes Gleiten)

Bei den nachfolgenden Ausführungen wird ausschließlich die Versagensart „Rutschung“ betrachtet. Erosionen und Verflüssigungseinflüsse spielen für den Nutzungsbereich des modifizierten Feinbodenartendiagramms (Eignungsbewertung von Rekultivierungsböden unter dem Aspekt der Langzeitfunktionalität) keine Rolle. Die Kriechdeformation kann als Vorstufe einer Rutschung angesehen werden und wird nicht extra betrachtet. Bei den Rutschungen handelt es sich um schichtparalleles Gleiten auf ebenen Flächen. Die Betrachtungen sind meist zwei-dimensional, da die Kraftwirkungen in Falllinienrichtung wirken. Lediglich bei konvexen Ausrundungen des Deponiekörpers können zusätzlich noch Spreizbeanspruchungen auftreten, die im Folgenden aber keine Berücksichtigung finden [WUDTKE et al., 2008].

Maßgebend für den Gleitsicherheits- bzw. Standsicherheitsnachweis in Trennflächen eines Schichtsystems sind die DIN EN 1997-1 (EC 7) [2005], DIN 1054 [2005] und DIN 4084 [2002]. Der Grenzzustand ist ein schichtparalleles Gleiten, welches gemäß DIN 1054 [2010] dem Grenzzustand GEO-3 zugeordnet wird [WITT & RAMKE, 2008; PRINZ & STRAUß, 2006].

Die gültigen nationalen und internationalen Normen geben vor, dass der Standsicherheitsnachweis nach dem Teilsicherheitskonzept zu führen ist. Der Nachweis ist mittels einer Gegenüberstellung von Einwirkungen (E_d) und Widerständen (R_d) zu führen [DACHROTH, 2002; PRINZ & STRAUß, 2006; ENGEL & LAUER, 2010].

Auf Grundlage von charakteristischen Angaben werden die Bemessungswerte für die Einwirkungen und Widerstände ermittelt. Der Bemessungswert einer Einwirkung wird durch Multiplikation des charakteristischen Wertes der Einwirkung mit dem gültigen Teilsicherheitsbeiwert (je nach Grenzzustand und Bemessungssituation) errechnet. Der Bemessungswert für den Widerstand wird durch Division der charakteristischen Größe mit dem Teilsicherheitsbeiwert gewonnen [WUDTKE, et al., 2008].

Die Standsicherheit ist gegeben, wenn für alle Bemessungssituationen gilt, dass die Summe aller Einwirkungen kleiner als die vorhandenen Gleitwiderstände ist (Gleichung 9):

$$E_d \leq R_d \text{ bzw. } \mu = E_d / R_d \leq 1 \quad (9)$$

Das Maß der Standsicherheit lässt sich über den Ausnutzungsgrad (μ) darstellen. Dieser muss unter 1 liegen und wird wie nachfolgend gezeigt (Gleichung 10) berechnet [WITT & RAMKE, 2008; PRINZ & STRAUß, 2006; ENGEL & LAUER, 2011]:

$$\mu = \frac{\sin \beta [(1-m) \cdot d \cdot \gamma_k \cdot \gamma_G + m \cdot d \cdot \gamma_{r,k} \cdot \gamma_G + p_k \cdot \gamma_Q]}{c'_d + \cos \beta \cdot \tan \varphi_d [(1-m) \cdot d \cdot \gamma_k + m \cdot d \cdot \gamma'_{r,k} + p_k]} \quad (10)$$

β ... Neigungswinkel der Gleitfuge;

m ... durchströmter Anteil der Mächtigkeit der Schicht;

d ... Mächtigkeit der Schicht normal zur Gleitfuge ($d = h \cdot \cos \beta$);

γ_k ... charakteristische Wichte des Bodens;

γ_φ ... Teilsicherheitsbeiwert für den Reibungswert φ ;

$\gamma'_{r,k}$... charakteristische Wichte der durchströmten Bodenschicht unter Auftrieb;

γ_G ... Teilsicherheitsbeiwert für ständige Beanspruchungen;

$\gamma_{k,r}$... charakteristische Wichte der wassergesättigten Bodenschichten;

p_k ... schichtparallele Verkehrslast;

γ_c ... Teilsicherheitsbeiwert für die Kohäsion;

γ_Q ... Teilsicherheitsbeiwert für ungünstig veränderliche Einwirkungen;

c'_d ... Bemessungswert der wirksamen Kohäsion in der Gleitfuge; sinngemäß Adhäsion a'_d bei geosynthetischen Reibungspartnern;

φ_d ... Bemessungswert des wirksamen Reibungswinkels in der Gleitfuge; sinngemäß σ_d bei geosynthetischen Reibungspartnern;

φ_k ... charakteristischer Wert des wirksamen Reibungswinkels in der Gleitfuge; sinngemäß σ_k bei geosynthetischen Reibungspartnern

Um die verschiedenen standsicherheitsrelevanten Situationen im Lebenszyklus eines Bauwerkes zu berücksichtigen, werden Bemessungssituationen definiert.

Dabei werden ständige (BS-P), vorübergehende (BS-T) und außergewöhnliche (BS-A) Bemessungssituationen unterschieden [WITT, 2009]. Die Teilsicherheitsbeiwerte für die unterschiedlichen Bemessungssituationen sind in Tabelle 32 angegeben.

Tabelle 32: Teilsicherheitsbeiwerte für den Nachweis der Gleitsicherheit nach Gl. 10 [WITT, 2009]

Teilsicherheitsbeiwerte		Bemessungssituation		
		BS-P	BS-T	BS-A
ständige Einwirkungen	γ_G	1,00	1,00	1,00
ungünstig veränderliche Einwirkungen	γ_Q	1,30	1,20	1,00
Reibungsbeiwert $\tan \phi'$ in der drainierten Scherfuge und Reibungsbeiwert $\tan \sigma$ in Scherfugen mit geosynthetischen Reibungspartnern	$\gamma_{\phi'}$ γ_{δ}	1,25	1,15	1,10
Kohäsion in der dränierten Scherfuge und Adhäsion in Scherfugen mit geosynthetischen Reibungspartnern	γ_c γ_a	1,25	1,15	1,10

BS-P ... Eigengewicht der Abdichtung und der Überlagerung incl. tolerierbarem Überprofil Einstau der Dränage und Schneelast

BS-T ... Eigengewicht der Abdichtung und der Überlagerung, Einstau der Dränage und Verkehrslasten aus dem Baustellenverkehr

BS-A ... Eigengewicht der Abdichtung und der Überlagerung, Einstau der Dränage, standortspezifischen Schneelast, Verkehrslasten und Zusatzlasten (z. B. Erdbeben)

Die standortspezifische Schneelast ist nach DIN 1055 [2005] festzulegen. Die GDA Empfehlung 2-20 ist zur Ermittlung der Einstauhöhe in die Dränage zu verwenden [WITT & RAMKE, 2003].

Für die Gültigkeit der Ebene „Standicherheit“ sind folgende Randbedingungen zu beachten:

- Anwendung der Bemessungssituation BS-P inkl. der Teilsicherheitsbeiwerte
- Schneelastzone 2 gemäß DIN 1055-5 [2005] bzw. DIN EN 1991-1-3 [2010] mit $s_k = 0,85 \text{ kN/m}^2$
- Böschungslängen von 30 m und 80 m
- Böschungsneigung von 1:2 (26,57°) und 1:3 (18,43°) [in Anlehnung an BURKHARDT et al., 2010]
- Berechnungen für die Bodenarten Sand (S), Lehm (L), Schluff (U) und Ton (T)
- Betrachtung der Kontaktfuge natürlicher Boden zu Filtervlies
- Berechnungen für den drainierten Zustand der Kontaktfuge
- Mächtigkeit der durchströmten Schicht (d_w) im Rekultivierungsboden
 $d_w = 0,1 \cdot d$ (d ... Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht) unter Beachtung der Ausführungen von MCENROE [1993]

Die Auswahl der bodenartenspezifischen Kenngrößen (Reibungswinkel, Kohäsion und Wichte) basiert auf den Ausführungen im Entwurf zur DIN 1055-2 [2007] und sind in Tabelle 33 zusammengefasst.

Dabei wurden folgende Festlegungen getroffen:

- Sand: Lagerungsdichte: mitteldicht
Bodenart: Kies, Sand weit oder intermittierend gestuft
Kurzzeichen nach DIN 18196: GW, GI, SW, S mit $6 \leq U \leq 15$
- Lehm: Bodenart: leicht plastischer Schluff ($w_L \leq 35\%$)
Kurzzeichen nach DIN 18196: UL
Zustandsform: steif
Wichte γ : bei erdfeuchten Bedingungen
- Schluff: Bodenart: mittelpastischer Schluff ($35\% \leq w_L \leq 50\%$)
Kurzzeichen nach DIN 18196: UM
Zustandsform: steif
Wichte γ : bei erdfeuchten Bedingungen
- Ton: Bodenart: mittelpastischer Ton ($35\% \leq w_L \leq 50\%$)
Kurzzeichen nach DIN 18196: TM
Zustandsform: steif
Wichte γ : bei erdfeuchten Bedingungen

Tabelle 33: Bodenartenspezifische Kennwerte für die Standsicherheitsberechnung aus dem Entwurf zur DIN 1055-2 [2007]

Bodenart*	Böschungsneigung		Böschungslänge [m]	Schichtmächtigkeit [m]	Reibungswinkel φ' [°]	Kohäsion c' [kN/m ²]	Wichte γ [kN/m ³]
S	1:2	26,57°	30	1,5	32,5	0	18
S	1:2	26,57°	80	1,5	32,5	0	18
S	1:2	26,57°	30	2,0	32,5	0	18
S	1:2	26,57°	80	2,0	32,5	0	18
S	1:3	18,43°	30	1,5	32,5	0	18
S	1:3	18,43°	80	1,5	32,5	0	18
S	1:3	18,43°	30	2,0	32,5	0	18
S	1:3	18,43°	80	2,0	32,5	0	18
L	1:2	26,57°	30	1,5	27,5	2	18,5
L	1:2	26,57°	80	1,5	27,5	2	18,5
L	1:2	26,57°	30	2,0	27,5	2	18,5
L	1:2	26,57°	80	2,0	27,5	2	18,5
L	1:3	18,43°	30	1,5	27,5	2	18,5
L	1:3	18,43°	80	1,5	27,5	2	18,5
L	1:3	18,43°	30	2,0	27,5	2	18,5
L	1:3	18,43°	80	2,0	27,5	2	18,5

Bodenart*	Böschungsneigung		Böschungslänge [m]	Schichtmächtigkeit [m]	Reibungswinkel ϕ' [°]	Kohäsion c' [kN/m ²]	Wichte γ [kN/m ³]
U	1:2	26,57°	30	1,5	22,5	5	18
U	1:2	26,57°	80	1,5	22,5	5	18
U	1:2	26,57°	30	2,0	22,5	5	18
U	1:2	26,57°	80	2,0	22,5	5	18
U	1:3	18,43°	30	1,5	22,5	5	18
U	1:3	18,43°	80	1,5	22,5	5	18
U	1:3	18,43°	30	2,0	22,5	5	18
U	1:3	18,43°	80	2,0	22,5	5	18
T	1:2	26,57°	30	1,5	17,5	10	19,5
T	1:2	26,57°	80	1,5	17,5	10	19,5
T	1:2	26,57°	30	2,0	17,5	10	19,5
T	1:2	26,57°	80	2,0	17,5	10	19,5
T	1:3	18,43°	30	1,5	17,5	10	19,5
T	1:3	18,43°	80	1,5	17,5	10	19,5
T	1:3	18,43°	30	2,0	17,5	10	19,5
T	1:3	18,43°	80	2,0	17,5	10	19,5

* Bodenarten nach DIN 4220 [2008]

Sämtliche Standsicherheitsberechnungen (Ergebnisse in Tabelle 34) erfolgten mit dem Programm GGU-Stability (Version 9) der Firma Civilserve GmbH aus Steinfeld.

Durchgeführt wurden die Berechnungen im Labor an der HTW Dresden.

Das Gleiten auf einer ebenen bzw. vorgegebenen Fläche stellt den einfachsten Mechanismus bzgl. des Böschungsbruches dar. Zur Berechnung wurde das Verfahren für ebene Gleitflächen nach JANBU gemäß DIN 4084 [2002] zu Grunde gelegt.

Bei dem Berechnungsverfahren bzgl. der Standsicherheit bei ebenen Gleitflächen (Abbildung 64) wird berücksichtigt, dass auf den Erdkörper über der Gleitebene die Eigengewichtskraft G und die Auflast P wirken.

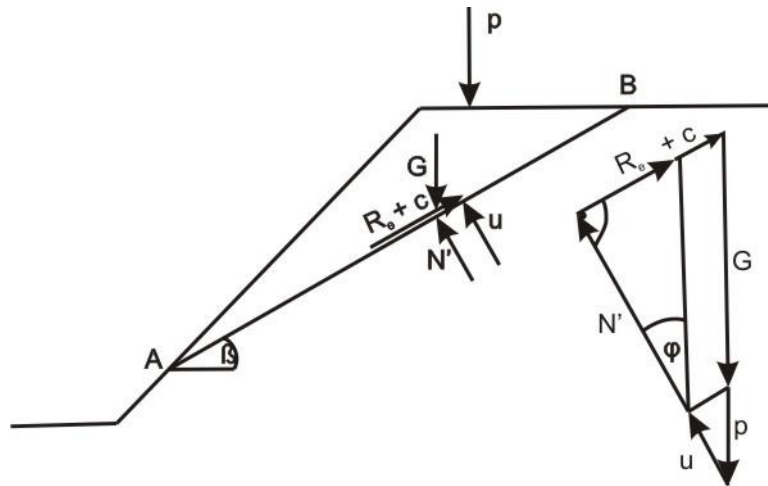


Abbildung 64: Kräfteansatz und Kräftedreieck zur grafischen Standsicherheitsberechnung bei einer ebenen Gleitfläche auf Basis der Auflast (p), der Eigengewichtskraft (G), der Gleitflächen (A-B), der Resultierenden aus den Normalspannungen (N'), der Reibungskraft (R_e), der Kohäsion (c), dem Porenwasserdruck (u), dem Reibungswinkel (φ) und dem Neigungswinkel der Gleitfläche (β) [PRINZ & STRAUß, 2006]

Der Bruchmechanismus lässt sich grafisch oder rechnerisch lösen. Mit einem Kräftedreieck kann die grafische Lösung erzielt werden. Dabei wirkt die Resultierende (N') der Normalspannungen infolge der Eigengewichtskraft und der Last senkrecht gerichtet auf die Gleitfläche.

Die erforderliche Reibungskraft (Gl. 10) und die Kohäsionskraft (Gl. 11) können aus dem Kräftedreieck bestimmt werden [PRINZ & STRAUß, 2006].

Rechnerisch erfolgt die Gegenüberstellung der wirksamen Eigengewichtskraft des Gleitkörpers mit der rückhaltenden Reibungskraft auf der Gleitfläche.

Die Grenzzustandsbedingung ist erfüllt, wenn Gl. 12 zutrifft [DACHROTH, 2002].

$$R_e = N' \cdot \tan \varphi \quad (10)$$

$$C = c \cdot l \quad (11)$$

$$\frac{G \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi + c \cdot l}{G \cdot \sin \beta} \geq 1 \quad (12)$$

R_e ... Reibungskraft; N' ... Resultierende der Normalspannungen; φ ... Reibungswinkel;

G ... Eigengewichtskraft; C ... Kohäsionskraft; c ... Kohäsion; l ... Gleitfläche;

β ... Neigungswinkel der Gleitfläche

Tabelle 34: Ergebnisse der Standsicherheitsberechnungen für die Bemessungssituation BS-P mit dem Programm GGU-Stability (Version 9)

Bodenart*	Böschungsneigung		Böschungslänge [m]	Schichtmächtigkeit [m]	Ausnutzungsgrad μ_{\max} [-]
S	1:2	26,57°	30	1,5	1,31
S	1:2	26,57°	80	1,5	1,20
S	1:2	26,57°	30	2,0	1,12
S	1:2	26,57°	80	2,0	1,20
S	1:3	18,43°	30	1,5	0,72
S	1:3	18,43°	80	1,5	0,79
S	1:3	18,43°	30	2,0	0,69
S	1:3	18,43°	80	2,0	0,80
L	1:2	26,57°	30	1,5	1,20
L	1:2	26,57°	80	1,5	1,40
L	1:2	26,57°	30	2,0	1,23
L	1:2	26,57°	80	2,0	1,43
L	1:3	18,43°	30	1,5	0,82
L	1:3	18,43°	80	1,5	0,95
L	1:3	18,43°	30	2,0	0,84
L	1:3	18,43°	80	2,0	0,98
U	1:2	26,57°	30	1,5	1,42
U	1:2	26,57°	80	1,5	1,72
U	1:2	26,57°	30	2,0	1,45
U	1:2	26,57°	80	2,0	1,77
U	1:3	18,43°	30	1,5	0,93
U	1:3	18,43°	80	1,5	1,16
U	1:3	18,43°	30	2,0	0,99
U	1:3	18,43°	80	2,0	1,20
T	1:2	26,57°	30	1,5	1,63
T	1:2	26,57°	80	1,5	2,09
T	1:2	26,57°	30	2,0	1,73
T	1:2	26,57°	80	2,0	2,13
T	1:3	18,43°	30	1,5	1,08
T	1:3	18,43°	80	1,5	1,43
T	1:3	18,43°	30	2,0	1,19
T	1:3	18,43°	80	2,0	1,46

* Bodenarten nach DIN 4220 [2008]

Die entsprechenden grafischen Nachweise der Standsicherheitsuntersuchungen sind in Anlage 4 aufgezeigt.

Die Abbildung 65 veranschaulicht die Integration der Ergebnisse aus den Standsicherheitsbetrachtungen (exemplarisch für spezifische Randbedingungen) auf das Feinbodenartendiagramm. Die Unterebenen „Standsicherheit“ für die weiteren Randbedingungen sind in Anlage 3.3 dargestellt.

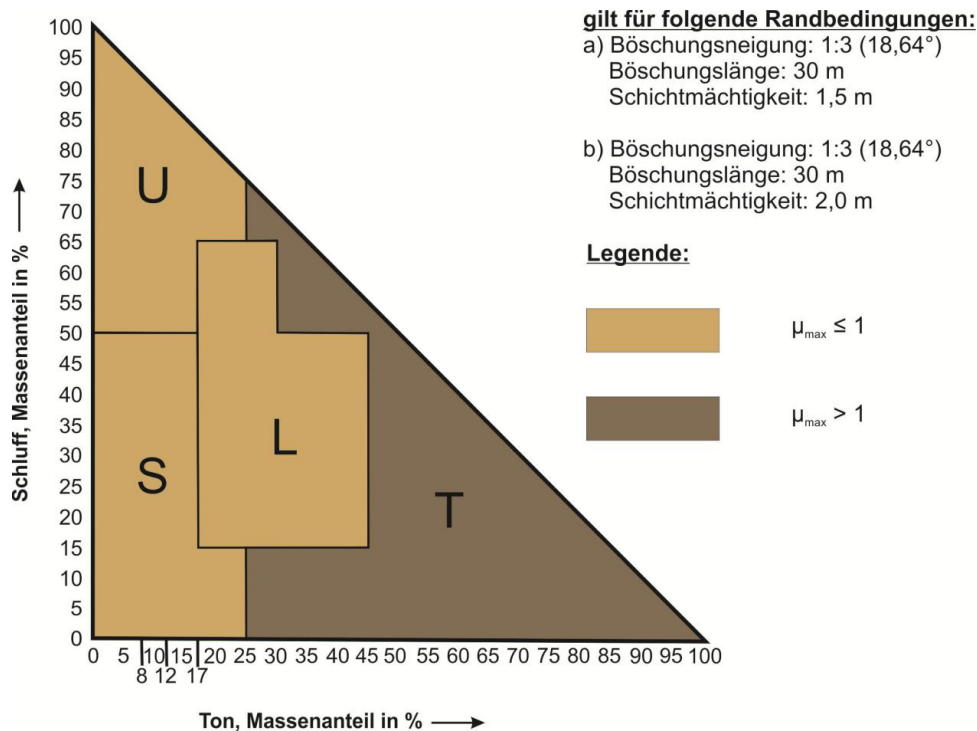


Abbildung 65: Ebene „Standsicherheit“ für spezifische Randbedingungen auf der Basis unterschiedlicher Körnungszusammensetzungen

Mit Hilfe des modifizierten bzw. über die erweiterten Betrachtungsebenen qualifizierte Feinbodenartendreieck ist eine Abschätzung der Bodenqualitäten für die Errichtung einer standortspezifischen Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht möglich. Das Hilfsmittel erlaubt erstmals eine interdisziplinäre Bewertung von Böden unter Beachtung von bodenkundlichen, bodenmechanischen und pflanzenspezifischen Anforderungen.

5.2 Nutzung des Dreiecks der Phasenzusammensetzung nach RUDERT

Die Anforderungen an Rekultivierungsschichten sind nicht widerspruchsfrei. Zum einen ist der Boden nach bodenkundlichen Gesichtspunkten so locker wie möglich einzubauen, zum anderen müssen Mindestanforderungen an die Scherfestigkeit und die Zusammendrückbarkeit erfüllt werden, um die Standsicherheit zu gewährleisten [STOCK, 2010].

Der Einbau mineralischer Böden muss unter Einhaltung eines bestimmten Verdichtungsgrads und Wassergehalts erfolgen, da nur dann bodenspezifische Qualitätsanforderungen (z. B. nFK, LK) eingehalten werden.

Die Vorauswahl bzw. Festlegung der geeigneten Materialien erfordert zeit- und kostenintensive Untersuchungen. Im Zuge der Eignungsprüfung ist ein geeigneter Boden

auszuwählen und durch Versuche die erforderliche Verdichtung so festzulegen, dass alle Anforderungen (z. B. an die Scherfestigkeit und die Zusammendrückbarkeit) erfüllt werden [ENGEL, 2003]. Im Sinne der Gewährleistung einer ausreichenden Sicherheit müssen Reserven (Sicherheiten) eingeplant und zeitabhängige Veränderungen berücksichtigt werden [KAMMEL et al., 2008].

Auf der Basis des Dreiecks der Phasenzusammensetzung nach RUDERT [1977] soll ein einfaches Verfahren zur Definition der Spannweite gleichbleibender Eigenschaften unter Berücksichtigung aller bodenkundlichen, bodenmechanischen und vegetationstechnischen Aspekte erarbeitet werden.

5.2.1 Aufbau des Dreiecks der Phasenzusammensetzung

Als Grundlage für die Entwicklung eines Bemessungskonzepts wird die Darstellung der Phasenzusammensetzung des Bodens im $n_w/(1-n)$ Koordinatensystem nach RUDERT [1977] benutzt. Die Linien gleicher Eigenschaften stellen für viele Parameter Geraden dar. Der Einfluss der Korndichte (Masse der Festsubstanz im getrockneten Zustand in der Raumeinheit [g/cm^3]) ist über den Porenanteil (n - Verhältnis des Volumens der Poren zum Gesamtvolumen) und den wassergefüllten Porenanteil (n_w) bereits berücksichtigt.

RUDERT [1977] nutzte diese Darstellung, um die Kennwerte der mechanischen Eigenschaften künstlich verdichteter Böden mit den Parametern der Phasenzusammensetzung zu verknüpfen. Durch ENGEL [2002] wurde diese Methode zur Beschreibung der Scherfestigkeit und Zusammendrückbarkeit teilgesättigter, feinkörnig-bindiger Böden benutzt und erweitert [2003].

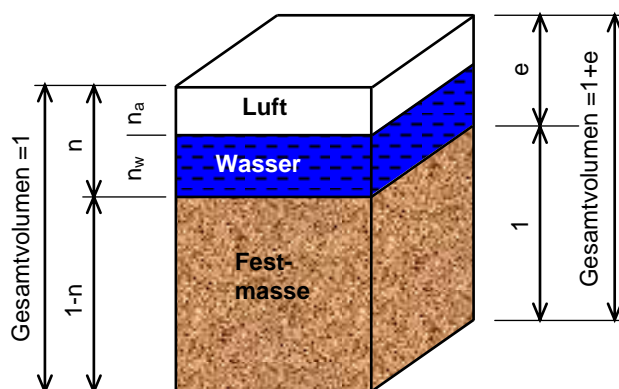


Abbildung 66: Grafische Darstellung des Dreiphasensystems „Boden“ [AL-AKEL et al., 2007]

Die Idealisierung der Bodenzusammensetzung (Abbildung 66) bildet die Grundlage des Modells. Die Unterteilung erfolgt in die feste, flüssige und gasförmige Phase. Die Quantifizierung der Massen- bzw. Volumenanteile führt zu den Kennwerten der Phasenzusammensetzung.

Die graphische Darstellung des Dreiphasensystems beruht daher auf der Gleichung 11:

$$(1-n) + n_w + n_a = 1 \text{ bzw. } V_S + V_W + V_a = 1 \quad (11)$$

$(1-n)$ bzw. V_S ... Teilvolumen des Feststoffs; n_w bzw. V_W ... Teilvolumen des Wassers;

n_a bzw. V_a ... Teilvolumen der Luft

Bei dieser Vereinfachung wird der Einfluss des partikelgebundenen Porenwassers und damit der effektiven Porosität vernachlässigt. Es darf in diesem Zusammenhang nicht übersehen werden, dass Strömungs- und Transportprozesse wesentlich von Porengrößen und Verteilung der Porenkanäle abhängen, was u. a. die Ursache für den Unterschied der Durchlässigkeit gesättigter Böden in senkrechter und horizontaler Richtung ist. Das Gleiche trifft auf das Be- und Entwässerungsverhalten von Böden bei Teilsättigung zu. Auch hierfür ist die Verteilung der Porenkanäle maßgebend [AL-AKEL et al., 2007; KAMMEL et al., 2008].

RUDERT [1977] wählte zur Verdeutlichung der komplexen Zusammenhänge und der Überlagerungsmöglichkeiten zwischen den Volumenverhältnissen im Dreiphasensystem eine einfache grafische Darstellung (Abbildung 67), in welchem die wichtigsten Zusammenhänge im Boden dargestellt werden.

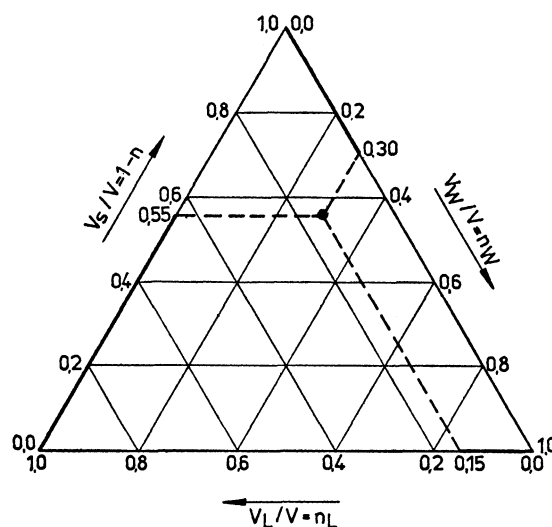


Abbildung 67: Darstellung des Prinzips der Volumenverhältnisse der Bodenphasen im Dreiecksnetz [RUDERT, 1977]

Eine wesentliche Weiterentwicklung durch RUDERT [1977] ist die Darstellung im modifizierten rechtwinkligen Dreieck. Mit Hilfe des rechtwinkligen Koordinationssystems ist der Zustand des Bodens im Dreiphasensystem mit 2 Bestimmungsgrößen ($1-n$ und n_w) zu beschreiben.

Das modifizierte Dreiecksnetz ermöglicht es, die Eigenschaften des Bodens im teilgesättigten Zustand vorherzusagen [ENGEL, 2003]. Spezifische Ausführungen zum Einsatzspektrum des modifizierten Dreiecks der Phasenzusammensetzung nach RUDERT [1977] sind in AL-AKEL et al. [2007] und KAMMEL et al. [2008] beschrieben.

5.2.2 Anpassung des Dreiecks der Phasenzusammensetzung nach RUDERT für Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten

Die Kenngrößen des Bodens zur Eingrenzung des für den Einbau optimalen Bereichs der Phasenzusammensetzung sind:

- Linien gleicher Spannungen zur Begrenzung der Zusammendrückbarkeit
- Permanenter Welkepunkt und Feldkapazität
- Schrumpfgrenze zur Vermeidung von zu feuchtem Einbau und den damit verbundenen Schrumpfrissen
- Proctordichte zur Festlegung des Verdichtungsgrads

Für die Vorauswahl von Böden sollten Kennzahlen auf der Grundlage einfach bestimmbarer Eigenschaften, wie der Fließgrenze w_L , der Plastizitätszahl I_p und der Porenzahl e bestimmt werden. Entsprechende Verfahren wurden für die bodenmechanischen Kennzahlen durch ENGEL [2002] erarbeitet.

Am Beispiel der bereits in Kapitel 3.4.5 getroffenen Festlegung von Einbaukriterien für die Böden der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz soll nun die Nutzung des Dreiecks der Phasenzusammensetzung nach RUDERT [1977] für Rekultivierungs- / Wasserhaushaltsschichten verdeutlicht werden.

Eine bodenkundliche Anforderung ist eine möglichst große nutzbare Feldkapazität. Der Bereich lässt sich durch den volumetrischen Wassergehalt n_w bei den zwei vorgegebenen Kapillarspannungen, $pF = 1,8$ (FK) und $pF = 4,2$ (PWP) beschreiben.

Durch Auftragen der entsprechenden Linien in das modifizierte Dreieck und unter Berücksichtigung der Verdichtungskurve aus dem Proctorversuch (Anlage 1) wird der zulässige Bereich für den Einbau des Bodens begrenzt (Abbildung 68). Die grau hinterlegten Bereiche fallen aufgrund des Wassergehaltes oberhalb der FK bzw. unterhalb von PWP aus den weiteren Betrachtungen heraus.

Wegen den Vorgaben in der DepV [2009] hinsichtlich der nFK (220 mm über die gesamte Bodensäule) fällt der Bereich von $nFK < 0,22$ ebenfalls heraus und ist grau markiert.

Als Grenzwert für den Einbauwassergehalt wurde die Schrumpfgrenze w_s des bindigen Materials festgelegt. Durch den Einbau mit einem Wassergehalt unterhalb von w_s werden spätere Schrumpfrissbildungen vermieden. Die Schrumpfgrenze ist als volumenbezogene Wassergehaltsangabe ($w_s = 25$ Vol.-%) im Diagramm abgetragen (Abbildung 69).

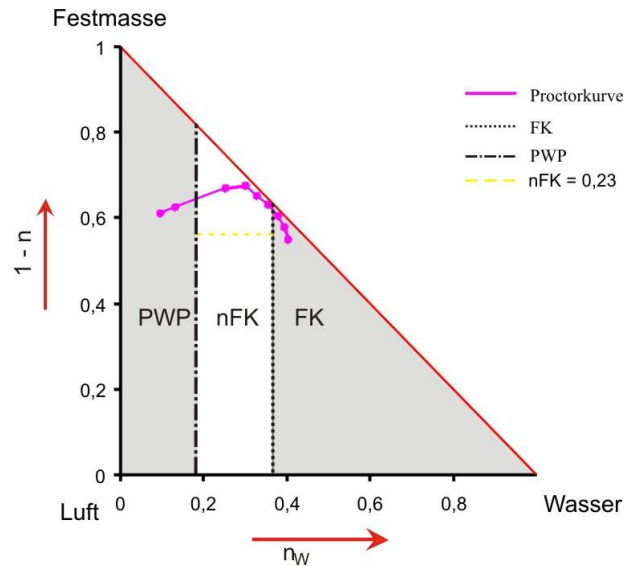


Abbildung 68: Integration der Proctorkurve sowie des Wasserrückhaltevermögens des bindigen Bodens in das Dreieck der Phasenzusammensetzung nach RUDERT [1977]

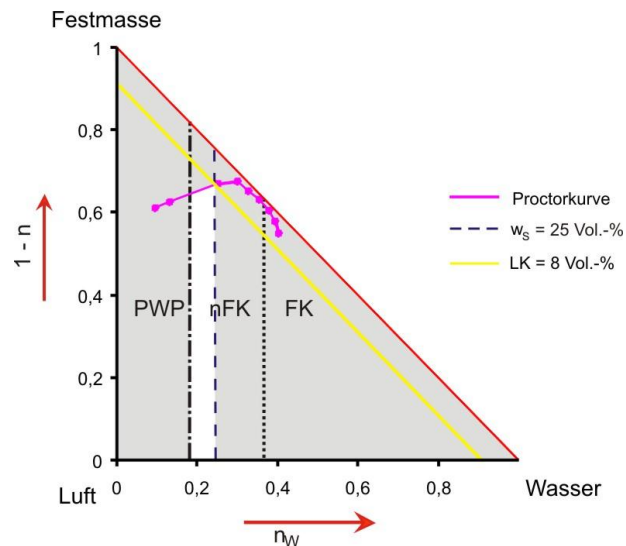


Abbildung 69: Integration weiterer bodenspezifischer Kennwerte (LK, w_s) in das Dreieck der Phasenzusammensetzung nach RUDERT [1977]

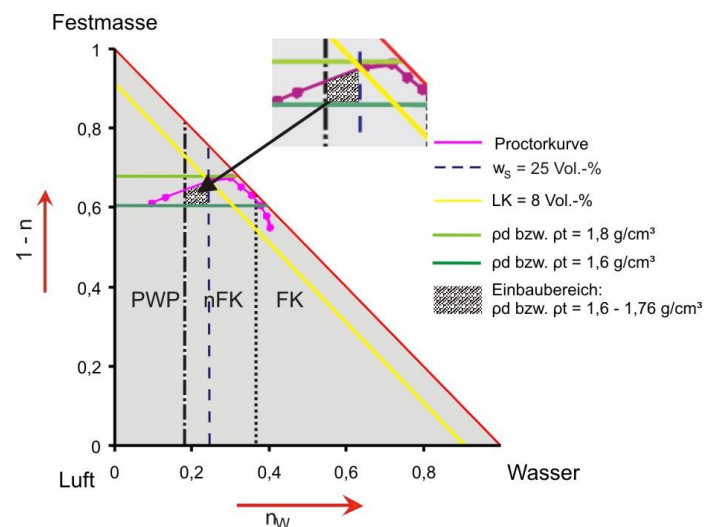


Abbildung 70: Integration der Einbauspante bzgl. der Trockendichte in das Dreiecksnetzes der Phasenzusammensetzung nach Rudert [1977]

Da ein größerer Verdichtungsgrad als 100%-Proctordichte als nicht sinnvoll anzusehen ist, sind die Bereiche oberhalb der Proctorkurve sowie alle Bereiche mit $LK < 8$ Vol.-% grau hinterlegt und spielen für die Festlegung der Einbaubedingungen des bindigen Bodens keine Rolle mehr (Abbildung 69).

Im Ergebnis der Eignungsuntersuchungen der Böden im Gelände, mit Hilfe des modifizierten Feinbodenartendiagramms, ist der Bereich der Trockendichte (ρ_d) festgelegt, mit dem das bindige Material eingebaut werden muss. Wird diese Spanne der Trockendichte im Dreieck abgetragen, so lassen sich die Schwankungsbreite des Wassergehalts und der Trockendichte, in dem das Bodenmaterial letztendlich eingebaut werden kann, ablesen (Abbildung 70).

Im Ergebnis dessen können so die konkreten Einsatzgrenzen des jeweiligen Bodens bestimmt und visualisiert werden. Die schraffierte Fläche in Abbildung 70 definiert den zulässigen Bereich der Phasenzusammensetzung des untersuchten Bodens. Außerhalb dieser Fläche erfüllt der Boden die Vorgaben nicht. Für den bindigen Boden der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz können auf Basis der Nutzung des Dreiecks der Phasenzusammensetzung nach RUDERT [1977] und unter Beachtung der Vorgaben der DepV [2009] die Einbauvorgabe wie folgt definiert werden:

- Trockendichte: 1,6 – 1,76 g/cm³
- Wassergehalt: 18 – 25 Vol.-%.

6 Schlussfolgerung

In der neuen DepV [2009] werden erstmals konkrete Anforderungen an die Qualität einer Wasserhaushaltsschicht gestellt. Hiernach muss eine minimale Bodensäule von 1,5 m ein pflanzenverfügbares Wasserrückhaltevermögen (nFK) von mindestens 220 mm aufweisen. Die Mächtigkeit der Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht ist dabei immer an die Schutzerfordernisse der darunter liegenden Abdichtungskomponenten anzupassen.

Die in der DepV [2009] vorgegebenen Zeiträume für die Nachweisführung der Funktionalität (DK I: Durchsickerung ≤ 20 mm/a, im 5-jährigen Mittel; DK II: Durchsickerung ≤ 60 mm/a, aber höchstens 10% vom langjährigen Niederschlagsmittel bis spätestens 5 Jahre nach Herstellung) sind durchaus kritisch zu werten. Dem DK II-System wird für die Leistungserbringung eine „Übergangszeit“ eingeräumt, während ein DK I-System die Leistung im 5-jährigen Mittel erbringen muss. Da der Bewuchs in Abhängigkeit vom Standort eine entsprechende Zeit für seine vollständige Ausbildung und Entwicklung benötigt, ist es zweckmäßiger, auch für DK I-Systeme mit einer Wasserhaushaltsschicht eine bewuchsabhängige „Übergangszeit“ festzulegen.

Erfahrungen aus den vorgelegten Untersuchungen sowie aus Wissenschaft und Praxis bzgl. der Wirksamkeit und Effizienz einer Wasserhaushaltsschicht zeigen drei wesentliche Hauptfaktoren [SCHOENHERR et al., 2011; EGLOFFSTEIN et al., 2009; BLUME et al., 2011]:

- Klimatische Wasserbilanz
- Boden (im Wesentlichen: Trockendichte, nutzbare Feldkapazität, Luftkapazität, Wassergehalt)
- Bewuchs (im Wesentlichen: Durchwurzelung und Verdunstung)

Aus den Untersuchungen an der Lysimeteranlage in Bautzen/Nadelwitz sowie weiteren Messungen an Wasserhaushaltsschichten in unterschiedlichen Gebieten von Deutschland wird ferner deutlich, dass die Einsatzgrenzen einer Wasserhaushaltsschicht nicht ausschließlich an den mittleren jährlichen Niederschlagsmengen festzumachen sind. Ein entscheidendes Kriterium ist die Klimatische Wasserbilanz (KWB). Ist diese ausgeglichen bzw. geringfügig negativ (mehr ETP als Niederschlag), ist der Einsatz einer Wasserhaushaltsschicht (unter Berücksichtigung aller Randbedingungen) als mögliche Sicherungskomponente einer Oberflächenabdichtung empfehlenswert. An Standorten mit einer deutlich positiven KWB ist eine ausgewiesene Dichtung entsprechend dem aktuellen Stand der Technik (z. B. mineralische Dichtung, TRISOPLAST®, Geosynthetische Tondichtungsbahnen) unerlässlich.

Das Wasserrückhaltevermögen des Bodens ist insbesondere von der Bodenart und der -beschaffenheit abhängig [BLUME et al., 2011]. Untersuchungen von SCHOENHERR et al. [2011], MÜLLER et al. [2009; 2009b] und AL-AKEL et al. [2009; 2009a] an der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz, die Langzeituntersuchungen von MELCHIOR et al. [2010b] sowie KONOLD et al. [2005] verdeutlichen, dass das Wasserrückhaltevermögen einer Wasserhaushaltsschicht viel detaillierter zu beschreiben ist. Die nutzbare Feldkapazität von 220 mm allein über die komplette Bodenmächtigkeit zu charakterisieren, erweist sich als nicht hinreichend genau. Wesentlich ist der tatsächlich durch die Vegetation ausschöpfbare Bodenraum, der von der Durchwurzelungstiefe abhängt.

Aus den vorgelegten Untersuchungen an der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz wird deutlich, dass die Wirksamkeit der Wasserhaushaltsschichten, unabhängig von Bodenart, -mächtigkeit und -einbau sowie Vegetation eine deutliche Differenzierung außerhalb der Vegetationsperioden aufweisen. Untersuchungen von WOLSFELD [2005] bestätigen diese Ergebnisse ebenfalls.

Die Ergebnisse dieser Arbeit bekräftigen erste Ansätze von DWYER [2003], WOLSFELD [2005], AL-AKEL et al. [2009], MÜLLER et al. [2009], EGLOFFSTEIN et al. [2009] sowie MELCHIOR [2010]. Demnach ist die Funktionalität und Wirksamkeit einer Wasserhaushaltsschicht vor allem durch die Wechselbeziehung Boden-Vegetation

gekennzeichnet. Je tiefgründiger die Bodensäule durchwurzelt wird, desto größer ist, in Abhängigkeit vom bodenspezifischen Wasserrückhaltevermögen, die Wirksamkeit der Wasserhaushaltsschicht.

Die primäre Wasserzehrung aus dem Bodenwasserspeicher einer Wasserhaushaltsschicht erfolgt über die Evapotranspiration, deren Wirkungstiefe direkt proportional zur Durchwurzelungstiefe ist. Entscheidend ist demnach die nFK im Durchwurzelungsraum.

Unter Beachtung der Vorgaben aus der DepV [2009] ist es im Rahmen der Planung und Realisierung einer Wasserhaushaltsschicht zu empfehlen, die Mächtigkeit anhand der nFK im Durchwurzelungsraum sowie aber auch der Schutzbedürfnisse der tieferliegenden Abdichtungskomponenten zu dimensionieren. Eine Erhöhung der Mächtigkeit über die Durchwurzelungstiefe und das Schutzniveau hinaus bewirkt keine wesentliche Verringerung der Durchsickerung. Dies wird durch die Ausführungen von EGLOFFSTEIN et al. [2009] gleichfalls untermauert.

Um eine langzeitsichere und funktionsfähige Wasserhaushaltsschicht zu gewährleisten, sind prognostizierte Klimaänderungen (z. B. trockenere Sommer, feuchtere Winterzeiträume, Temperaturerhöhung) in die Planungen zu integrieren. Für den Standort Bautzen bedeutet dies insbesondere, dass der Bodenwasserspeicher in der Lage sein muss, die prognostizierten zunehmenden Niederschlagsmengen im Übergangszeitraum, d. h. vom I. zum II. Quartal des Kalenderjahres aufzunehmen. Das Wasserrückhaltevermögen des Bodens muss deshalb größer sein als die mittlere langjährige Infiltrationsmenge im hydrologischen Winterhalbjahr. Inwieweit die Änderung des Klimas auch Auswirkungen auf die Verdunstung des Bewuchses hat, muss in weiteren Forschungsarbeiten untersucht werden.

Die Qualität und der Einbau bestimmen wesentlich die Langzeitfunktionalität einer Wasserhaushaltsschicht. Im letzten Jahrzehnt gewann der locker geschüttete (unverdichtete) Einbau des Rekultivierungsbodens bei der Rekultivierung von Deponien immer größere Bedeutung, u. a. unter dem Aspekt einer hohen nFK und einer ausreichenden LK. Dass dieser locker geschüttete Einbau bautechnische Probleme mit sich bringen kann und zur Reduzierung des Wasserrückhaltevermögens führt, zeigt sich anhand aktueller Veröffentlichungen [GRUBER & BEITH, 2009; EGLOFFSTEIN et al., 2009; STOCK, 2010; SCHOENHERR et al., 2011]. Der unverdichtet eingebaute Boden zeigte u. a. auf der Hausmülldeponie Spremlingen bereits im ersten Winter nach Fertigstellung starke Setzungserscheinungen [EGLOFFSTEIN et al., 2009]. Ausführungen von GRUBER & BEITH [2009] sowie SCHOENHERR et al. [2011] sowie die Ergebnisse aus dieser Arbeit bestätigen dieses Erkenntnis. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Forderung nach geringen Einbaudichten nur mit hohem bautechnischem Aufwand zu erfüllen ist.

Nach dem derzeitigen Stand der Kenntnisse relativiert sich der Einfluss des Bodeneinbaus auf die standortspezifische Kennwerte und Zustandsgrößen des Bodens. Die im Rahmen der Herstellung der Wasserhaushaltsschicht erreichten bodenphysikalischen Eigenschaften (z. B. LK, nFK) gleichen sich, unabhängig von der Einbaumethode (u. a. aufgrund der Setzungen), an ungestörte Verhältnisse an. Daraus lässt sich ableiten, dass es effektiver ist, bereits in der Planung von höheren und definierten Lagerungs- bzw. Trockendichten (z. B. $> 1,6 \text{ g/cm}^3$ [GRUBER & BEITH, 2009]) auszugehen. Der unverdichtete Einbau birgt bei Einsatz von überwiegend schluffigem Material zudem eine höhere Erosionsgefahr. Aus diesem Grunde muss das Oberbodenmaterial eine ausreichende Infiltrationskapazität besitzen und darf nicht zur Verschlämmung führen.

Eine weitere wesentliche Einflussgröße für die Funktionalität einer Wasserhaushaltsschicht ist der Bewuchs. Die Auswahl der Vegetation ist im Zuge der ersten Aktivitäten der Rekultivierungsplanung festzulegen und die Wechselwirkung von Boden und Vegetation bei der Auslegung der Wasserhaushaltsschicht zu berücksichtigen.

Die Differenz aus der durchschnittlichen Niederschlagsmenge (350 mm) und der mittleren Evapotranspiration (60 mm, [DOMMERMUTH & TRAMPF, 1995]) für das Winterhalbjahr in der Region Görlitz liefert einen Wert von 290 mm. Das bedeutet, dass ein lehmiger Sand oder ein sandiger Lehm als Rekultivierungsmaterial u. a. eine nFK von 300 mm aufweisen muss. Reduziert man die durchschnittlichen Niederschlagsmengen (ca. 350 mm) im hydrologischen Winterhalbjahr um die mittlere monatliche Evapotranspiration (ca. 60 mm) auf einem lehmigen Sand oder sandigen Lehm für die Region Görlitz, so charakterisieren sich die Anforderungen an das eingebaute Rekultivierungsmaterial u. a. auf eine nFK von ca. 300 mm im durchwurzelten Bodenbereich. Auf Basis der Ergebnisse der Arbeit sind diese Werte auch auf den Standort Bautzen übertragbar. Für das bindige Bodenmaterial (nFK: 23 Vol.-%) an der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz bedeutet dies, dass es mit einer Mächtigkeit von mindestens 1,5 m einzubauen ist. Die Schichtstärke und das Wasserrückhaltevermögen entsprechen zwar den Vorgaben der DepV [2009], aber wie die Sickerwassermengen der Lysimeter zeigen, können die Randbedingungen von 20mm/a (DK I) bzw. 60 mm/a (DK II) noch nicht eingehalten werden.

Bei der Auswahl des Bewuchses sind die natürlichen und anthropogenen Randbedingungen zu berücksichtigen. Dabei spielen Faktoren der natürlichen ökologischen Konkurrenz eine genauso entscheidende Rolle wie die klimatischen Verhältnisse am Standort, die Nährstoffsituation im Boden und die anthropogenen Einflüsse (z. B. Mahd). Die aufgebrachte Vegetation unterliegt einer zeitlichen Entwicklung und ändert die Bewuchscharakteristik (z. B. Artenspektrum, Gesamtdeckungsgrad). Dabei muss vor allem bei Baumbeständen mit einer Entwicklungszeit von mehreren Jahrzehnten gerechnet werden. Inwieweit die spezifischen Bodenverdichtungen sowie die Standortgegebenheiten einer Deponie eine

signifikante Auswirkung auf das Durchwurzelungsverhalten (z. B. Durchwurzelungstiefe und -intensität) und den Gesamtdeckungsgrad sowie das Artenspektrum haben, muss in weitergehenden Forschungsarbeiten detaillierter untersucht werden.

Als Stand der Technik hat sich in den letzten Jahren herauskristallisiert, dass man ergänzend zu den ingenieurtechnischen Planungsleistungen entsprechende kalibrierte und validierte Simulationsrechnungen nutzt. Dadurch können zeitlich variierende Prognoserechnungen für ein Sicherungssystem durchgeführt werden. Entsprechende Qualitätskontrollen und die Festlegung von Kriterien für Qualitätskontrollen sind wesentlicher Bestandteil jeder Simulationsrechnung. Folgende Kriterien können für eine gute Modellierungspraxis herausgestellt werden [SCHNEIDER et al., 2003; SCHOENHERR et al., 2005]:

- Qualifizierte Systemanalyse
- Qualifizierte Daten
- Qualifiziertes mathematisches Modell (verifiziert, kalibriert, validiert)
- Qualifizierte Modellierer

Wegen der Vielzahl denkbarer Aufgabenstellungen im Zusammenhang mit dem Wasserhaushalt von Deponien, vor allem aber wegen der Vielzahl, der Komplexität und der Verflechtung der wasserhaushaltlichen Prozesse, die im Sicherungssystem wirken, erweisen sich im Allgemeinen einfache Ansätze zur Quantifizierung des wasserhaushaltlichen Verhaltens als nicht ausreichend. Als zielführend haben sich anwendungsorientierte Wasserhaushaltsmodelle (z. B. BOWAHALD, HELP) erwiesen [GERLACH, 2007; HENKENMELLIES, 2008; DUNGER, 2009a; STOCK, 2009; STOCK, 2010; BERGER 2010].

BERGER [2010] macht deutlich, dass die vorhandenen Simulationsmodelle für Deponieoberflächenabdichtungssysteme (HELP, BOWAHALD) sehr geeignete Hilfswerkzeuge bei der Planung von langzeitsicheren Oberflächenabdichtungssystemen darstellen. Sie bedürfen in Zukunft weiteren Entwicklungen und Validierungen, insbesondere von validierten Messdaten aus Lysimeter-, Kipprinnen- oder Testfeldversuchen. Schwerpunkt weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den nächsten Jahren sollte die Optimierung der Verdunstungsberechnung als Teilmodell der Wasserhaushaltsmodellierung sein [BERGER, 2000]. Der Effekt einer zu kleinen Bewertung der Verdunstung bei bindigen Böden konnte z. B. durch DUNGER et. al. [2010] bereits bei Modellrechnungen mit BOWAHALD an anderen Standorten sowie zu den vorliegenden Ergebnissen dieser Arbeit beobachtet werden. Zudem sind Weiterentwicklungen des Verdunstungsmoduls für höheren (Sträucher und Bäume) sowie für mehrstöckigen Bewuchs (höherer Bewuchs mit Gras- / Kräuterschicht) notwendig [BERGER, 2010].

Die Datenbasis der Lysimeteranlage Bautzen/Nadelwitz stellt eine gute Grundlage für Modellvalidierungen und -kalibrierungen dar. Unter diesem Aspekt ist es für zukünftige Detailuntersuchungen von großem Interesse, inwieweit mit weiteren Simulationsmodellen (z. B. HYDRUS2D, HELP) ähnliche Ergebnisse wie mit BOWAHALD erzielt werden können. Gleichfalls biete der Einsatz theoretisch-orientierter Modelle (z. B. auf Basis des RICHARDS-Ansatz) die Möglichkeit, fehlende Felddaten, z. B. zur Saugspannung nachträglich zu modellieren.

Um die o. g. Anforderungen an eine langzeitfunktionelle Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht zu gewährleisten, sind regional verfügbare Böden im Rahmen der Eignungsuntersuchung und vor allem hinsichtlich des geplanten Rekultivierungszieles auszuwählen. Dabei sind die Interaktionen zwischen Boden, Bodeneinbau und Vegetation zwingend zu berücksichtigen. Die in den vorgelegten Untersuchungen aufgegriffenen methodischen Ansätze unterschiedlicher Fachdisziplinen konnten für die Planung von Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschichten modifiziert sowie qualifiziert und damit wesentlich verbessert und für die Praxis anwendbar gemacht werden.

Die Erweiterung des Feinbodenartendiagramms mit den Ebenen „nutzbare Feldkapazität“, „Durchwurzelung“ und „Standssicherheit“ erlaubt eine verbesserte anwendungs- und qualitätsorientierte Bewertung von potenziellen Rekultivierungsböden hinsichtlich ihrer Eignung. Das modifizierte Feinbodenartendiagramm ermöglicht auf Basis einer Grobcharakterisierung der Körnung grundlegende Aussagen über die Eignung des Materials. Im Umkehrschluss kann mit Hilfe des modifizierten Feinbodenartendiagramms aber auch ein Bodenmaterial charakterisiert werden, welches für eine spezifische Baumaßnahme beschafft werden soll.

Die interdisziplinäre Herangehensweise der erarbeiteten Methodik gewährleistet bereits im Rahmen der Materialauswahl die notwendige Berücksichtigung des Wechselspiels von Boden und Vegetation sowie Standssicherheit des Systems. Dies stellt eine tragende Säule für die Funktionalität einer Wasserhaushaltsschicht dar.

Für die qualitätsgerechte Nutzung des modifizierten Diagramms sind die mit der Arbeit ausgewiesenen Randbedingungen zu berücksichtigen. Das geschaffene Hilfsmittel ersetzt keinesfalls detaillierte Planungsschritte (z. B. objektspezifische Standssicherheitsberechnung, Ermittlung des bodenspezifischen Wasserrückhaltevermögens sowie der Körnungslinie). Es stellt jedoch eine wesentliche interdisziplinäre Entscheidungshilfe bei der Auswahl der Rekultivierungsböden dar.

Neben der Auswahl der Böden spielt die Festlegung der Einbaukennwerte eine entscheidende Rolle für die Funktionalität der Wasserhaushaltsschicht und die Erreichung des Rekultivierungszieles. Die Nutzung des Dreiecks der Phasenzusammensetzung nach

RUDERT [1977], inklusive der Modifikationen durch ENGEL [2002], stellt eine gute Basis für die Ausweisung von Einbauspannen für spezifische Einbaukennwerte dar. Die Nutzung dieses Dreiecks erlaubt bei der Festlegung von Einbaukennwerten, unter Berücksichtigung gültiger gesetzlicher Anforderungen (z. B. nFK: 220 mm) sowie Empfehlungen (z. B. LK: 8%), die Ausweisung von zulässigen Schwankungsbreiten für den Bodeneinbau. Damit können die berechtigten Forderungen der Praxis [GRUBERT & BEITH, 2009] hinsichtlich einer einfacheren Qualitätsprüfung im Rahmen der Einbauprüfungen nachhaltig ermöglicht werden.

Generell kann gesagt werden, dass die Auswahl der Böden, in Abhängigkeit vom Rekultivierungskonzept und der regionalen Verfügbarkeit der Erdstoffe, die Einbautechnik bestimmt.

Gegenstand weiterer Untersuchungen muss, vor allem unter dem Aspekt der teilweise geringen Verfügbarkeit potenzieller Rekultivierungsböden, der Einsatz von technischen Bodensubstraten sein [MÜLLER et al., 2008; MUELLER et al., 2009a; SCHATZ, 2010]. Dabei ist die Nutzung der entwickelten Hilfsmittel anzupassen und zu prüfen, ob und inwieweit die Schätzwerte (z. B. für LK, nFK) der bodenkundlichen Kartieranleitung [AG BODEN, 2005] noch Gültigkeit besitzen [MELCHIOR, 2010].

Mit Hilfe dieser Arbeit wird ein weiterer Baustein zur qualitätsgerechten und optimierten Planung und Realisierung von Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschichten geschaffen. Erstmals werden wissenschaftliche, praxisorientierte und interdisziplinäre Herangehensweisen vereint und somit Wechselwirkungen von Boden und Pflanzen sowie dem dadurch beeinflussten Bodenwasserhaushalt berücksichtigt. Die geschaffenen Hilfsmittel stellen einfache und praxisnahe Arbeitsgrundlagen für die qualitätsgerechte und zielorientierte Planung von langzeitstabilen Oberflächenabdichtungen dar.

Quellenverzeichnis

AG Boden – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.) (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Auflage, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart

Al-Akel, S.; Engel, J.; Lauer, C.; Müller, M.; Baumert, R.; Schoenherr, J. I. (2007): Zusammenhängende Betrachtung geotechnischer und bodenkundlicher Aspekte bei der Planung von qualifizierten Rekultivierungsschichten. Deponieworkshop Zittau-Liberec 2007 – Einsatzgrenzen, Sanierung und Wirtschaftlichkeit von Deponiesicherungsvarianten. Tagungsband, Wissenschaftliche Berichte der Hochschule Zittau/Görlitz, Heft 96, Eigenverlag, Zittau, S. 45 - 56, ISBN 978-3-9811021-6-1.

Al-Akel, S.; Engel, J.; Müller, M.; Schoenherr, J. I. (2009): Untersuchungen zum Durchströmungsverhalten am Beispiel von Wasserhaushaltsschichten. In: Hochschule Zittau/Görlitz (Hrsg.): Deponieworkshop Zittau-Liberec 2009 – Anforderungen an Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten unter dem Einfluss des Klimawandels. Tagungsband, Wissenschaftliche Schriften des EU Ziel3/Cíl3-Projekts „Erdbau und Rekultivierung“, Heft 1, Eigenverlag, Zittau, S. 75 - 86, ISBN 978-3-9812655-4-5

Al-Akel, S.; Müller, M.; Engel, J.; Kammel, E.; Schoenherr, J.; Baloun, T. A. (2009): Wasserhaushaltsschichten zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altablagerungen Teil 2: verwendete Böden. In: Ifz Raumberg Gumpenstein (Hrsg.): Lysimeter – Perspektiven in Forschung und Anwendung. Tagungsband, 13. Gumpensteiner Lysimetertagung, Eigenverlag, Irdning (Österreich), S. 151 - 154, ISBN 978-3-902559-31-9

Albright, W. H.; Benson, C. H.; Gee, G. W.; Roesler, A. C.; Abichou, T.; Apiwantragoon, P.; Lyles, B. F.; Rock, S. A. (2004): Field Water Balance of Landfill Final Covers. J. Environ. Qual., vol. 33 (6), pp. 2317-2332, ISSN 0047-2425

Aldinger, E.; Seemann, D.; Konnert, V. (1996): Wurzeluntersuchungen auf Sturmwurf- flächen 1990 in Baden-Württemberg. Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung, Heft 38, HenkelDruck, Stuttgart

Allen, R. G.; Smith, M.; Perrier, A.; Pereira, L. S. (1994): An Update for Definition of Reference Evapotranspiration. ICID Bulletin, vol. 43 (2), pp. 1 - 34, ISSN 0300-2810

ATV-DVWK - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2002): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. Merkblatt 504. Eigenverlag der DWA, Hennef

Bachmann, J.; Bohne, H. (1999): Anpflanzung von Gehölzen zur Rekultivierung von Hausmülldeponien. Wasser & Boden, Jg. 51 (12), S. 43-47, ISSN 0043-0951

Baumgartner, A.; Liebscher H.-J. (1996): Lehrbuch der Hydrologie. Band 1: Allgemeine Hydrologie. 2. Auflage; Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Berlin, Stuttgart

Baumert, R.; Müller, M.; Schoenherr J. I. (2006): Langzeitverhalten ausgewählter Deponieoberflächenabdichtungen - 7 Jahre Testfeldbetrieb. In: Hochschule Zittau/Görlitz (Hrsg.): Deponieworkshop Zittau-Liberec 2006 – Langzeitverhalten von Deponieabdichtungen. Tagungsband, Wissenschaftliche Berichte der Hochschule Zittau/Görlitz, Heft 91, Eigenverlag, Zittau, S. 195-206, ISBN 978-3-9811021-3-0

BBodSchG (1999): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten. 17. März 1998 (BGBl. I S. 502 ff.), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 9. Dezember 2004 (BGBl. I S. 3214 ff.)

Behling, D. (2010): Dichtheit und Beständigkeit von abdichtenden Systemkomponenten in Testfeldern auf deutschen Deponien. Müll und Abfall, Jg. 42 (9), Erich-Schmidt Verlag, Berlin, S. 452 - 457, ISSN 0027-2957

- Behrens, W. (2006):** TRISOPLAST® - Darstellung aktueller Entwicklungen und Rahmenbedingungen zum Austrocknungsverhalten. In: Hochschule Zittau/Görlitz (Hrsg.): Deponieworkshop Zittau-Liberec 2006 – Langzeitverhalten von Deponieabdichtungen. Tagungsband, Wissenschaftliche Berichte der Hochschule Zittau/Görlitz, Heft 91, Eigenverlag, Zittau, S. 153-165, ISBN 978-3-9811021-3-0
- Bengtsson, L.; Bendz, D.; Hogland, W.; Rosqvist, H.; Åkesson, M. (1993):** Water balance for landfills of different age. J. Hydrol., vol. 158 (3-4), pp. 203 - 217, ISSN 0022-1694
- Benson, C.H.; Bosscher, P.; Lane, D.; Pliska, R. (1994):** Monitoring system for hydrologic evaluation of landfill final covers. Geotechnical Testing Journal, ASTM, vol. 17, pp. 138-149, ISSN: 0149-6115
- Benson, C. H.; Bohnhoff, G. L.; Apiwantragoon, P.; Ogorzalek, A. S.; Shackelford, C. D.; Albright, W. H. (2004):** Comparisation of model predictions and field data for an ET Cover. In: Hinshaw, H.; Hinshaw, L. (2004) (Hrsg.): Tailings and Mine Waste '04. Proceedings of the Eleventh Tailings and Mine Waste Conference in Vail, Colorado (USA), pp. 137-142, ISBN: 978-0-415-35939-9
- Berger, K. (2000):** Validation of the hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model for simulating the water balance of cover systems. Environmental Geology, vol. 39 (11), pp. 1261 - 1274, ISSN: 0943-0105
- Berger, K. (2005):** The HELP-Model (HELP(-USA), HELP-D, Visual HELP). In: Hochschule Zittau/Görlitz (Hrsg.): Landfill Workshop Zittau-Liberec 2005 – Dimensioning Landfill Surface Liner Systems – Using Water Balance Models. Tagungsband, Wissenschaftliche Berichte der Hochschule Zittau/Görlitz, Heft 86, Eigenverlag, Zittau, S. 47 - 58, ISBN 3-9811021-0-X
- Berger, K. (2010):** Modellvalidierung – Unentbehrlich, aufwendig, oft vergessen. Müll und Abfall, Jg. 42 (5), S. 240-245, ISSN 0027-2957
- Bieberstein, A.; Brauns, J.; Reith H. (2003):** Standsicherheit und Setzungsverhalten unverdichtet geschütteter Rekultivierungsschichten von Oberflächenabdichtungssystemen. Bautechnik, Jg. 80 (6), S. 372-379, ISSN 1437-0999
- Bishop, A. W. (1955):** The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. Géotechnique, Vol. 5 (1), pp. 7 - 17, ISSN: 0016-8505
- Blume, H.-P.; Horn, R.; Thiele-Bruhn, S. (2011):** Handbuch des Bodenschutzes - Bodenökologie und Bodenbelastung, vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. 4. Auflage, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
- BNatSchG (2009):** Gesetz über den Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz – BNatSchG). vom 29. Juli 2009 BGBl. I, S. 2542 ff.
- Bohn, U.; Welss, W. (2003):** Die potenzielle natürliche Vegetation. In: Leibniz-Institut für Länderkunde (Hrsg.): Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland - Band 3: Klima, Pflanzen- und Tierwelt. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg; Berlin
- Bothmann, P. (2005):** Die Bedeutung von Rekultivierungsschichten für Deponien. In: Konold, W. (Hrsg.): Qualifizierte Rekultivierungsschichten. Tagungsband, Verlag des Instituts für Landespflege der Universität Freiburg, Freiburg, S. 4 - 11
- Braun, M.; Schmid, H.; Grundler, T. (2009):** Vergleich verschiedener Klee-Gras-Mischungen anhand der Wurzel- und Sprossleistung. In: Wiesinger K & Cais K (Hrsg.): Angewandte Forschung und Beratung für den ökologischen Landbau in Bayern. Tagungsband zum Ökolandbautag 2009, Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft 7, Lerchl-Druck, Freising, S. 35-42, ISSN 1611-4159
- Braun-Blanquet, J. (1951):** Pflanzensoziologie: Grundzüge der Vegetationskunde. 2. Auflage, Springer-Verlag, Wien

Briancon, L.; Girard, H.; Poulain, D. (2002): Slope stability of lining systems - experimental modeling of friction at geosynthetic interfaces. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 20 (3), pp. 147 - 172, ISSN 0266-1144

Campbell, M. D.; Gee, G. W.; Kirkham, R. R.; Phillips, S. J.; Wing, N. R. (1991): Water Balance Lysimetry at a Nuclear Waste Site. In: Allen, R. G.; Pruitt, W. O.; Howell, T. A.; Walter, I. A.; Jensen, M. E. (Hrsg.): *Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements – Proceedings of International Symposium on Lysimetry (Honolulu - Hawaii)*. Conference proceeding paper, New York, pp. 125 - 131, ISBN 0872628132

Dachroth, W. R. (2002): Handbuch der Baugeologie und Geotechnik. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York

Dehn, M.; Bürger, G.; Buma, J.; Gasparetto, P. (2000): Impact of climate change on slope stability using expanded downscaling. *Eng. Geol.*, vol. 55 (3), ISSN 0013-7952

Delfs, J. (1954): Niederschlagsrückhaltung (Interception) in verschieden alten Fichtenbeständen. *Mitteilungen des Arbeitskreises Wald und Wasser*, Heft-Nr. 1, S. 31 - 36

Dannowski, M. (1994): Einfluss differenzierter mechanischer Bodenbelastungen auf Bodengefügeeigenschaften, Durchwurzelbarkeit und Pflanzenertrag eines sandigen Moränenstandortes. *Schriftenreihe Bodenökologie und Bodengenese*, Heft 13, Fachgebiete Bodenkunde und Regionale Bodenkunde, Institut für Ökologie der TU Berlin, Eigenverlag

DepV (2002): Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV). Vom 24. Juli 2002 BGBl. I, S. 2807 geändert am 26. November 2002, BGBl. I, Seite 4417 ff

DepV (2009): Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts - Artikel 1 Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV). Vom 29. April 2009, BGBl. I Seite 900 ff

Deutscher Bundestag (2009): Verordnung der Bundesregierung – Entwurf der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts. Drucksache 16/12223 vom 12.03.2009, ISSN 0722-8333

DIN 1054:2010-12-00 (2010): Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau.

DIN 1055:2007-01 (2007): Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Bodenkenngrößen (Entwurf)

DIN ISO 11259:2000-08-00 (2000): Bodenbeschaffenheit - Vereinfachte Bodenbeschreibung

DIN 11274:1998-01 (1998): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens – Laborverfahren

DIN 11274:2011-01 (2011): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens - Laborverfahren (ISO 11274:1998 + Cor 1:2009) - Entwurf

DIN ISO 11277:2002-08-00 (2002): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden - Verfahren mittels Siebung und Sedimentation

DIN 1185:1973-12-00 (1973): Dränung; Regelung des Bodenwasser-Haushaltes durch Rohrdränung, Rohrlose Dränung und Unterbodenmelioration

DIN 14688:2004-11-00 (2004): Geotechnik im Bauingenieurwesen - Bestimmung und Klassifizierung von Böden

DIN 18125:1999-08-00 (1999): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Dichte des Bodens - Teil 2: Feldversuche

DIN 18127:1997-11-00 (1997): Baugrund - Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch

DIN 18130:1998-05-00 (1998): Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts

DIN 18 196:2006-06-00 (2006): Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke

DIN 19682-2:2007-11-00 (2007): Bodenbeschaffenheit - Felduntersuchungen - Teil 2: Bestimmung der Bodenart

DIN 19682-5:2007-11-00 (2007): Bodenbeschaffenheit - Felduntersuchungen - Teil 5: Bestimmung des Feuchtezustands des Bodens

DIN 19731:1998-05-00 (1998): Bodenbeschaffenheit - Verwertung von Bodenmaterial

DIN 1986: 1989-08-06 (1989): Technische Baubestimmungen; Entwässerungsanlagen

DIN EN 1991-1-3:2010-12 (2010): Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten; Deutsche Fassung EN 1991-1-3:2003 + AC:2009

DIN EN 1997-1:2005-10 (2005): Eurocode 7- Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln.

DIN 4035:1995-08-00 (1995): Stahlbetonrohre und zugehörige Formstücke - Maße – Technische Lieferbedingungen

DIN 4049-3:1994-10-00 (1994): Hydrologie – Teil 3, Begriffe zur quantitativen Hydrologie.

DIN 4084:2002-11 (2002): Baugrund – Geländebruchberechnungen.

DIN 4220:2008-11-00 (2008): Bodenkundliche Standortbeurteilung - Kennzeichnung, Klassifizierung und Ableitung von Bodenkennwerten

Dommermuth, H.; Trampf, W. (1995): Daten zum Bodenwasserhaushalt in Deutschland Zeitraum 1951-1980 – Potenzielle und tatsächliche Evapotranspiration, Bodenfeuchte und Wasserstressindex, Band 1: Gras. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main

Döring, D. (2007): Untersuchung des Verformungsverhaltens mineralischer Rekultivierungsschichten unter Berücksichtigung des Wasserhaushalts. Diplomarbeit, Fakultät Bauingenieurwesen/Architektur, HTW Dresden, Dresden

Dunger, V. (2005): Modelling of a landfill water balance system using the BOWAHALD Model. In: Hochschule Zittau/Görlitz (Hrsg.): Landfill Workshop Zittau-Liberec 2005 – Dimensioning Landfill Surface Liner Systems - Using Water Balance Models. Tagungsband, Wissenschaftliche Berichte der Hochschule Zittau/Görlitz, Heft 86, Eigenverlag, Zittau, S. 59 - 80, ISBN 3-9811021-0-X

Dunger, V. (2007): Entwicklung und Anwendung des Modells BOWAHALD zur Quantifizierung des Wasserhaushalts oberflächengesicherter Deponien und Halden. Habilitation, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg

Dunger, V. (2009): Austrocknung von Oberflächenabdichtungen unter dem Aspekt des Klimawandels – In wie weit ist das Deponiewasserhaushaltsmodell BOWAHALD hierfür brauchbar? In: Hochschule Zittau/Görlitz (Hrsg.): Deponieworkshop Zittau-Liberec 2009 – Anforderungen an Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten unter dem Einfluss des Klimawandels. Tagungsband, Wissenschaftliche Schriften des EU Ziel3/Cil3-Projekts „Erdbau und Rekultivierung“, Heft 1, Zittau, S. 165 - 176, ISBN 978-3-9812655-4-5

Dunger, V. (2009a): Modelle BOWAM und BOWAHALD - Beispiele für Modellkalibrierungen. Vortrag zum Themenschwerpunkt „Validität der Wasserhaushaltsbilanzierungen“, Expertengesprächsrunde „Wasserhaushaltsschichten im Deponiebau“, Potsdam, 25.11.2009, <<http://www.mugv.brandenburg.de/vortraege/deponiebau/v5.pdf>>, recherchiert am 09.11.2010

Dunger, V.; Müller, M., Schoenherr, J. I. (2010): Rahmenbedingungen für wirksame Wasserhaushaltsschichten gemäß Anforderungen DepV. In: Egloffstein, T.; Burkhardt, G. (Hrsg.): Die Umsetzung der neuen Deponieverordnung – Praktische Erfahrungen im Vollzug und erste Änderungsverordnung zur neuen DepV. Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten, Band 19, ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Karlsruhe, S. 189 - 200, ISBN 978-3-939662-08-2

DVWK – Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (Hrsg.) (1980): Regeln zur Wasserwirtschaft - Empfehlungen zum Bau und Betrieb von Lysimetern. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (Hrsg.), Heft 114, Verlag Paul Parey, Hamburg

DVWK – Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (Hrsg.) (1995): DVWK-Merkblatt 234: Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden - Teil 1: Mechanische Belastbarkeit. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn

DVWK – Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (Hrsg.) (1996): DVWK-Merkblätter 238: Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn

DWD – Deutscher Wetterdienst (2010): Daten zu den Standorten Bautzen/Kubschütz und Görlitz, http://werdis.dwd.de/werdis_de/WebWerdis_start.do, recherchiert am 05.05.2010

Dwyer, S. F. (2003): Water Balance Measurements and Computer Simulations of Landfill Covers. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of New Mexico, New Mexico (USA)

Dyck, S.; Peschke, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie. 3. Auflage; Verlag für Bauwesen Berlin, Berlin, 1995

Eckart, M.; Dunger V. (1999): Wasserhaushaltsmodelle der Aerationszone zur Optimierung von Deponieabdeckungen unter Nutzung der Modelle AERA und BOWAHALD. Zeitschrift für Mathematische Geologie, Jg. 4 (3), ISSN 1431-8016

Egloffstein, T.; Burkhardt, G. (2002): Alternative Dichtungsmaterialien für Oberflächenabdichtungen von Deponien - Entwicklungen der zurückliegenden Jahre - Tendenzen für die Zukunft. In: Rosenberg, M.; Bergs, T.; Scholz, C. (Hrsg.): 10. Braunschweiger Deponie-seminar 2002 – Qualitätssicherung und Innovation. Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Heft 69, Schmidt Buch-binderei und Druckerei, Braunschweig, S. 109-140, ISBN 3-927 610-60-7

Egloffstein, T.; Burkhardt, G. (2004): Die Wasserhaushaltsschicht bei der Rekultivierung von Deponien - günstige Kombination mit alternativen Dichtungssystemen oder teures "Draufsatteln" auf die Regelabdichtung? In: Kühle-Weidemeier, M. (Hrsg.): Praxistagung Deponie 2005. Cuvillier Verlag, Hannover, S. 86 - 101, ISBN 3-86537-284-8

Egloffstein, T.; Burkhardt G.; Sturm D.; Bräckelmann H. (2004): Erfahrungen mit der Planung und dem Bau von locker geschütteten Wasserhaushaltsschichten am Beispiel der KMD Spremlingen. In: Kranert, M. (Hrsg.): Zeitgemäße Deponietechnik 2004 - Deponietechnik im Jahr der Entscheidungen - Deponiestilllegung und Verwertungsverordnung. Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 81, Kommissionsverlag R. Oldenbourg GmbH, München, S. 39-65, ISBN 3-486-27102-4

Egloffstein, T.; Sturm, D.; Bräckelmann, H. (2009): Erfahrungen beim Bau von Wasserhaushalts-/Rekultivierungsschichten. In: Hochschule Zittau/Görlitz (Hrsg.): Deponieworkshop Zittau-Liberec 2009 – Anforderungen an Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten unter dem Einfluss des Klimawandels. Tagungsband, Wissenschaftliche Schriften des EU Ziel3/Cíl3-Projekts „Erdbau und Rekultivierung“, Heft 1, Zittau, S. 19 - 34, ISBN 978-3-9812655-4-5

Egloffstein, T.; Sturm, D.; Bräckelmann, H. (2009a): Erfahrungen beim Bau von Wasserhaushalts-/Rekultivierungsschichten. Plenarvortrag, Expertengesprächsrunde „Wasserhaushaltsschichten im Deponiebau“, Potsdam, 25.11.2009, <http://www.mugv.brandenburg.de/vortraege/deponiebau/v2.pdf>, recherchiert am 09.11.2010

Ehrmann, O. (2005): Bodeneigenschaften und Bodenleben in unterschiedlich aufgebauten Rekultivierungsschichten. In: Konold, W. (Hrsg.): Qualifizierte Rekultivierungsschichten. Tagungsband, Verlag des Instituts für Landespflege der Universität Freiburg, Freiburg, S. 36 - 53

Ellenberger, H.; Weber, H. E.; Düll, R.; Wirth, V.; Werner, W.; Paulißen, D. (1992): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. 2. Verbesserte und erweiterte Auflage, Scripta Geobotanica 18, Lehrstuhl für Geobotanik der Universität Göttingen, Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Engel, J. (2002): Verfahren zur Festlegung von Kennwerten für bodenmechanische Nachweise. Mitteilungsheft 10 des Instituts für Geotechnik der TU Dresden, Eigenverlag, Dresden

Engel, J. (2003): Verfahren zur Vorhersage der Eigenschaften verdichteter Böden. In: Grabe, J. (Hrsg.): Experimente - Modellierung - Geräteentwicklung - Baustellenberichte - F+E-Bedarf. Tagungsband Bodenverdichtung, Heft 5, Eigenverlag des Arbeitsbereiches Geotechnik und Baubetrieb der TU Hamburg-Harburg, Hamburg, S. 13-27, ISBN 3-936310-05-X

Engel, J.; Lauer, C. (2010): Einführung in die Boden- und Felsmechanik. 1. Auflage. Hanser Fachbuchverlag, Leipzig

Engelmann, B. (2010): Entwicklungen beim Deponierecht: Die neue Deponieverordnung. In: KUMAS e. V. [Hrsg.): 11. Bayerische Abfall- und Deponietage 2010. Eigenverlag, Augsburg, R9 S. 1 - 6

Fabian, F.; Sängler, F. (2006): Rekultivierungsschichten als Komponenten der Deponieoberflächenabdichtung. In: Hochschule Zittau/Görlitz (Hrsg.): Deponieworkshop Zittau-Liberec 2006 – Langzeitverhalten von Deponieabdichtungen. Tagungsband, Wissenschaftliche Berichte der Hochschule Zittau/Görlitz, Heft 91, Zittau, S. 37 - 46, ISBN 978-3-9811021-3-0

Feddes, R. A.; Kabat, P.; van Bakel, P., J. T.; Bronswijk, J. J. B.; Halbertsma, J. (1988): Modelling Soil Water Dynamics in the Unsaturated Zone – State of the Art. J. Hydrol., vol. 100 (1-3), pp. 69 - 111, ISSN: 0022-1694

Fjodorowa, T. (2003): Quantifizierung der Komponenten des Wärme- und Wasserhaushaltes an Standorten im Einzugsgebiet der Mandau mit besonderer Berücksichtigung des latenten Wärmestromes. Dissertation, Internationales Hochschulinstitut Zittau, Zittau

FLL - Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau e. V. (Hrsg.) (1998): Empfehlungen zur Begrünung von Problemflächen. Schriftenreihe des FLL – Empfehlungen aus dem Arbeitskreis „Begrünung von Problemflächen“, Eigenverlag, Bonn

Freudenberger.net (2010): Saatgutmischungen. <http://www.freudenberger.net/landschaftsrasen.asp>; recherchiert am 23.07.2010

Freudenreich, R. (2007): Beschreibung der Lysimeteranlage zur Untersuchung von Wasserhaushaltsschichten der Deponie Bautzen/Nadelwitz. Studienarbeit, Fachbereich Mathematik/Naturwissenschaften, Hochschule Zittau/Görlitz, Zittau

Frey, W.; Lösch, R. (2004): Lehrbuch der Geobotanik. 2. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag GmbH, München

Gaertig, T.; Hildebrand, E. E.; Schäfer, J.; von Wilpert, K. (2000): Melioration stark verdichteter Waldböden: Die Wirkung mechanischer Bodenlockerung auf Bodenbelüftung und Durchwurzelung. Allgemeine Forstzeitschrift „Der Wald“, Jg. 55 (21), S. 1124 - 1126, ISSN 1430-2713

Gardner, W.; Widstoe, J. A. (1921): The movement of soil moisture. Soil Sci., vol. 11 (3), pp. 215 - 232, ISSN 0038-075X

GDA E2-32 (2000): Gestaltung des Bewuchses auf Abfalldeponien (Entwurf). <www.gdaonline.de>, recherchiert am 08.01.2010

GDA E 2-30 (2003): Modellierung des Wasserhaushalts der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien, überarbeitete Fassung, <www.gdaonline.de>, recherchiert am 08.01.2010

Gerlach, A. (2007): Wasserbilanzierung von Oberflächen-Abdichtungen von Deponien unter Verwendung von mathematischen Bilanzierungsmodellen. Dissertation, Fakultät Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Universität Karlsruhe, Karlsruhe

Grubert, P.; Beith, K. (2009): Erfahrungen aus der Eigen- und Fremdprüfung. Vortrag zum Themenschwerpunkt „Realisierbarkeit von Wasserhaushaltsschichten, Gültigkeit der Ansätze“, Expertengesprächsrunde „Wasserhaushaltsschichten im Deponiebau“, Potsdam, 25.11.2009, <<http://www.mugv.brandenburg.de/vortraege/deponiebau/v7.pdf>>, recherchiert am 09.11.2010

Hartmann, G.; Disse, M. (1997): Experimentelle Bestimmung der Hysterese der pF-Kurve und ihr Einfluss auf die Bodenwassermodellierung. Wasser & Boden, Jg. 49 (2), S. 31-36, ISSN 0043-0951

Haubrich, E. (2002): Neue Erkenntnisse bei der Rekultivierung von Deponien - Bau von Testfeldern im Rahmen eines Forschungsvorhabens. In: Rosenberg, M.; Bergs, T.; Scholz, C. (Hrsg.): 10. Braunschweiger Deponieseminar 2002 - Qualitätssicherung und Innovation. Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Heft 69, Schmidt Buchbinderei und Druckerei, Braunschweig, S. 23 - 46, ISBN 3-927 610-60-7

Haubrich, E.; Wattendorf, P. (2002): Forschungsvorhaben „Rekultivierung von Deponien“ - Ergebnisse aus Testfeldern in Baden-Württemberg. In: Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (Hrsg.): Fachinformation 3/2002: H 1 - 26. Eigenverlag, Halle

Haubrich, E. (2010): Ausführungen von Rekultivierungsschichten mit möglichst geringer Verdichtung – Erfahrungsbericht aus einem Forschungsvorhaben und Praxisbeispiele. In: Henken-Mellies, U. (Hrsg.): 21. Nürnberger Deponieseminar 2010 – Deponien nach 2009: Weiterbetrieb sowie Abdichtung und Nachsorge; Umgang mit Altablagerungen. Tagungsband, Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Heft 89, Eigenverlag LGA, Nürnberg, S. 83 -101

Heilmeier, H.; Schroiff, A. (2009): Klimawandel – Auswirkungen auf die Vegetation auf Rekultivierungsflächen. In: Hochschule Zittau/Görlitz (Hrsg.): Deponieworkshop Zittau-Liberec 2009 – Anforderungen an Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten unter dem Einfluss des Klimawandels. Tagungsband, Wissenschaftliche Schriften des EU Ziel3/Cil3-Projektes „Erdbau und Rekultivierung, Heft 1, Eigenverlag, Zittau, S. 91 - 102, ISBN 978-3-9812655-4-5

Heinke, K. (2010): Entwicklung der Sickerwassermengen bei abgedichteten Deponien im Freistaat Sachsen. In: Kilchert, M. (Hrsg.): 6. Leipziger Deponiefachtagung – Stilllegung, Nachsorge und Nachnutzung von Deponien. Tagungsband, Eigenverlag, Leipzig, B14 S. 1 - 15

Heinkele, T. (2009): Zeitliche Entwicklung der Sickerwasserraten rekultivierter Neulandböden – Beispiele aus dem Lausitzer Braunkohlenrevier. Vortrag zum Themenschwerpunkt „Realisierbarkeit von Wasserhaushaltsschichten, Gültigkeit der Ansätze“, Expertengesprächsrunde „Wasserhaushaltsschichten im Deponiebau“, Potsdam, 25.11.2009, <<http://www.mugv.brandenburg.de/vortraege/deponiebau/v8.pdf>>, recherchiert am 09.11.2010

Heinze, M.; Sänger, H.; Attula, R. (1995): Entwicklung einer Auswertungsmethode zur Abschätzung der effektiven Durchwurzelungstiefe an Forststandorten aus vorhandenen Labordaten. Abschlussbericht. BGR Hannover und C&E Consulting und Engineering GmbH Chemnitz, Hannover und Chemnitz 1995, unveröffentlicht

Henken-Mellies, U. (2008): Stand der GDA-Empfehlungen im Hinblick auf die Integrierte Deponieverordnung. In: Henken-Mellies (Hrsg.): 19. Nürnberger Deponieseminar 2008: Weiterbetrieb von Deponien sowie Stilllegung, Abdichtung und Nachsorge von Deponien. Tagungsband, Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Heft 87, Eigenverlag LGA, Nürnberg, S. 209 - 218

Heerten, G.; Koerner, R. M. (2008): Cover systems for landfills and brownfields. Land Contamination & Reclamation, vol. 16 (4), pp. 343 - 356, ISSN 0967-0513

Hoepfner, U. (2006): Das „Speicher- und Verdunstungskonzept“ alternativer Oberflächenabdeckungen: Messung und Simulation des Wasser- und Gashaushaltes und sein Einsatz bei der Sanierung der Wismut-Altlasten. Dissertation, Fakultät Geowissenschaften, Ruhr-Universität Bochum, Bochum

Hölting, B.; Coldewey, W. G. (2005): Hydrogeologie. 6. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, München

Ibraginov, F. A.; Zaalishvili, V. B.; Tedeev, T. R. (2001): Infiltration of moisture in a porous medium with incomplete saturation of pores. Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 38 (5), pp. 147 - 153, ISSN 0038-0741

Kammel, E.; Engel, J.; Al-Akel, S. (2008): Geotechnisches Modell zur Eigenschaftsbeschreibung des MBA-Materials, Tagungsband, 2. Fachtagung Geotechnik an der HTW Dresden, Eigenverlag, Dresden, S. 223 - 232, ISSN 1867-5883

Katzenbach, R.; Werner, A. (2007): Erhöhung der Standsicherheit von Deichen und Dämmen durch Bewuchs. In: Fiebig, M. (Hrsg.): 1. Departmentkongress Bautechnik & Naturgefahren. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, S. 6 - 9

Kaukal, B. (2010): 10 Monate neue Deponieverordnung – erste Erfahrungen. In: Henken-Mellies, U. (Hrsg.): Weiterbetrieb sowie Abdichtung und Nachsorge; Umgang mit Ablagerungen. Tagungsband zum 21. Nürnberger Deponieseminar, Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts Nürnberg, Heft 89, Eigenverlag der LGA, Nürnberg, S. 9 - 24

Keese, U.; Knappe S. (1996): Problemstellung und allgemeine Angaben zu vergleichenden Untersuchungen zwischen Lysimetern und ihren Herkunftsflächen am Beispiel von drei typischen Böden Mitteldeutschlands unter landwirtschaftlicher Nutzung. Arch. Acker-Pfl. Boden, Vol. 40, S. 409 - 429

Khire, M. V.; Benson, C. H.; Bosscher, P. J. (1997): Water Balance Modeling of Earthen Final Covers. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 123 (8), pp. 744-754, ISSN 0733-9410

Kleffling, J. (2010): Charakterisierung von Verdunstungseigenschaften differenzierter Vegetationsformen auf Wasserhaushaltsschichten. Diplomarbeit, Institut für Verfahrenstechnik, Torf- und Naturstoff-Forschung, Hochschule Zittau/Görlitz, Zittau

Kölsch, F. (2000): Standsicherheit von Hausmülldeponien nach 2005. Müll und Abfall, Jg. 32 (6), S. 368 - 374, ISSN 0027-2957

Konold, W.; Wattendorf, P.; Leisner B. (1997): Anforderungen an die Rekultivierungsschicht beim Rekultivierungsziel Wald. In: Egloffstein, T.; Burkhardt, G.; Czurda, K.: Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 103, Erich Schmidt Verlag GmbH, Berlin, S. 179 - 188, ISBN 3 503 04351 9

Konold, W.; Wattendorf, P.; Ehrmann, O.; Bieberstein, A.; Reith, H.; Bönecke, G.; Schnack-Kirchner, H. (2004): Wasserhaushalt und Bodenentwicklung qualifizierter Rekultivierungsschichten. Forschungsbericht FZKA-BWPLUS, Förderkennzeichen: BWD 21010, Institut für Landespflege der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Eigenverlag, Freiburg

Konold, W.; Wattendorf, P.; Ehrmann, O. (Hrsg.) (2005): Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren. Band 41, „culterra“, Verlag des Instituts für Landespflege der Universität Freiburg, Freiburg

KrW-AbfG (1994): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-/AbfG). vom 27. September 1994 BGBl. I, S. 2705 ff.

Küchler, W. (2010): Aktuellste Entwicklungen zum regionalen Klimawandel. In: Matschullat, J.; Bernhofer, C.; Küchler, W. (Hrsg.): Komplexe Erkenntnis – robustes Handeln. Annaberger Klimatage 2010, Medienzentrum der TU Bergakademie Freiberg, S. 14

Kuhr, M. (1999): Grobwurzelarchitektur in Abhängigkeit von Baumart, Alter, Standort und sozialer Stellung. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen

Künzel, O. (2009): Nutzbare Feldkapazität und Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten. Müll und Abfall, Jg. 41 (2), S. 55-57, ISSN 0027-2957

Kutschera L.; Lichtenegger, E. (1982): Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen. Band I: Monocotyledoneae, Fischer Verlag, Stuttgart

Kutschera, L.; Lichtenegger, E. (1992): Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen: Band II, Teil 1 Pteridophyta und Dicotyledoneae, Fischer Verlag, Stuttgart

Kutschera L.; Lichtenegger, E. (2002): Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher. Leopold Stocker Verlag. Graz, Stuttgart

LANUV NRW – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2010): Technische Anforderungen und Empfehlungen für Deponieabdichtungssysteme – Konkretisierungen und Empfehlungen zur Deponieverordnung. LANUV Arbeitsblatt 13, Eigenverlag, Recklinghausen

Larcher, W. (1994): Ökophysiologie der Pflanzen. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart

Lehnardt, F.; Brechtel, H.-M. (1980): Durchwurzelungs- und Schöpftiefen von Waldbeständen verschiedener Baumarten und Altersklassen bei unterschiedlichen Standortverhältnissen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung (German Journal of Forest Research), Jg. 151 (6/7), S. 120 - 127, ISSN 0002-5852

LfUG - Landesamt für Umwelt und Geologie Sachsen (Hrsg.) (1999): Materialien zur Altlastenbehandlung - Oberflächenabdichtung von Ablagerungen und Deponien. Lößnitz-Druck GmbH, Dresden

Lohse, A. (2002): Wasserhaushaltliche Untersuchungen zur Deponie Nadelwitz. Diplomarbeit, Fakultät Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg

Lyr, H.; Fiedler, H. J., Tranquillini, W. (1992): Physiologie und Ökologie der Gehölze. Gustav Fischer Verlag, Jena, Stuttgart

Madalinski, K. L.; Gratton, D. N.; Weismann, R. J. (2003): Evapotranspiration Covers: An Innovative Approach to Remediate and Close Contaminated Sites. *Remediation Journal*, vol. 14 (1), pp. 55 - 67, ISSN 1520-6831

Maier-Harth, U.; Melchior, S. (2001): Überprüfung der Wirksamkeit der 10 Jahre alten mineralischen Oberflächenabdichtung der ehemaligen Industriemülldeponie Prael in Sprendlingen, Kreis Mainz-Bingen. In: Maier-Harth, U. (Hrsg.): Oberflächenabdichtung und Rekultivierung von Deponien. Tagungsband, 4. Deponieseminar, Eigenverlag, Mainz, S. 121 - 182

Maier-Harth, U.; Bräckelmann, H.; Sturm D. (2005): Die Wasserhaushaltsschicht: Konzept und Durchführung am Beispiel der Hausmülldeponie Sprendlingen, Landkreis Mainz-Bingen. In: Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (Hrsg.): 5. Deponieseminar Sanierung, Oberflächenabdichtung, Rekultivierung & Nachsorge von Deponien. Tagungsband, odd GmbH Grafische Betriebe, Nieder-Olm, S. 75 - 114

Maier-Harth, U. (2005): Erfahrungen beim Bau von Wasserhaushaltsschichten auf Deponien in Rheinland-Pfalz. In: Konold, W. (Hrsg.): Qualifizierte Rekultivierungsschichten. Tagungsband, Verlag des Instituts für Landespfl ege der Universität Freiburg, Böblingen, S. 92 - 115

Maier-Harth, U. (2009): 10 Jahre Erfahrungen beim Bau von Wasserhaushaltsschichten. Vortrag zum Themenschwerpunkt „Realisierbarkeit von Wasserhaushaltsschichten, Gültigkeit der Ansätze“, Expertengesprächsrunde „Wasserhaushaltsschichten im Deponiebau“, Potsdam, 25.11.2009, <<http://www.mugv.brandenburg.de/vortraege/deponiebau/v10.pdf>>, recherchiert am 09.11.2010

Maile, A. (1997): Leistungsfähigkeit von Deponieoberflächenabdichtungssystemen zur Verminderung von Sickerwasser und Schadstoffemissionen bei Landschaftskörpern. Dissertation, Fachbereich Bauwesen, Universität Duisburg-Essen, Essen

Markwardt, N. (2009): Möglichkeiten und Grenzen von Wasserhaushaltsschichten als Alternative zu Abdichtungskomponenten in Oberflächenabdichtungen. Plenarvortrag, Expertengesprächsrunde „Wasserhaushaltsschichten im Deponiebau“, Potsdam, 25.11.2009, <<http://www.mugv.brandenburg.de/vortraege/deponiebau/v1.pdf>>, recherchiert am 09.11.2010

Martin, K.; Sauerborn, J. (2006): Agrarökologie. Verlag Eugen Ulmer KG, Stuttgart

Marzini, K. (2005): Bewährte und neue Saatgutmischungen für den Landschaftsbau. In: Lehr- und Versuchsanstalt Gartenbau Erfurt (Hrsg.): Garten- und Landschaftsbautag 2004/2005. Tagungsband, d m z druckmedienzentrum, Erfurt, S. 155 – 159

McEnroe, B. M. (1993): Maximum Saturated Depth over Landfill Liners. *J. Environ. Eng.*, vol. 119 (2), pp. 262-270, ISSN 0733-9372

Meggyes, T.; Simmons, E.; McDonald, C. (1998): Landfill capping: engineering and restoration – Part 2: Engineering of landfill capping systems. *Land Contamination & Reclamation*, vol. 6 (1), pp. 27 - 37, ISSN 0967-0513

Meissner, R.; Rupp, H.; Schubert M. (2000): Novel lysimeter techniques - A basis for improved investigation of water, gas and solute transport in soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, vol. 163, pp. 603 - 608, ISSN: 1436-8730

Melchior, S. (1993): Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. Dissertation, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Hamburg, Hamburg

Melchior, S. (1997): In situ studies of the performance of landfill caps (compacted soil liners, geomembranes, geosynthetic clay liners, capillary barriers). *Land Contamination & Reclamation*, vol. 5 (3), pp. 209 - 216, ISSN 0967-0513

Melchior, S.; Claussen, A. (2004): Praxiserfahrungen und Ergebnisse der Qualitätssicherung bei der Rekultivierung von Deponien. In: Kühle-Weidemeier, M. (Hrsg.): Praxistagung Deponie 2005. Tagungsband, Cuvillier Verlag, Hannover, S. 102 - 116, ISBN 3-86537-284-8

Melchior, S.; Steinert, B.; Raabe, S. (2010): Ergebnisse zur Wirksamkeit ausgewählter Oberflächenabdichtungssysteme der Versuchsfelder der MEAB auf der Deponie Deetz. In: Henken-Mellies, U. (Hrsg.): Weiterbetrieb sowie Abdichtung und Nachsorge; Umgang mit Ablagerungen. Tagungsband, 21. Nürnberger Deponieseminar, Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts Nürnberg, Heft 89, Eigenverlag der LGA, Nürnberg, S. 105 - 116

Melchior, S. (2010): Rekultivierungsschichten – Geltende Anforderungen, Stand der Technik und Praxiserfahrungen. In: Gebert, J.; Pfeiffer, E. M. (Hrsg.): Mikrobielle Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten. Hamburger Bodenkundlichen Arbeiten, Band 63, Eigenverlag, Hamburg, S. 25 - 42

Melchior, S. (2010a): Langzeitverhalten einer Dränmatte in einer Deponieoberflächenabdichtung – ein Fallbeispiel. In: Kilchert, M. (Hrsg.): 6. Leipziger Deponiefachtagung – Stilllegung, Nachsorge und Nachnutzung von Deponien. Tagungsband, Eigenverlag, Leipzig, B09 S. 1 - 23

Melchior, S.; Sokollek, V.; Berger, K.; Vielhaber, B.; Steinert, B. (2010b): Results from 18 Years of In-Situ Performance Testing of Landfill Cover Systems in Germany. J. Environ. Eng., vol. 136 (8), pp. 815 - 823, ISSN 0733-9372

Merta, M. (2001): Pflanzenphysiologische Messungen zur Berechnung der Verdunstung – Möglichkeiten und Grenzen. Dissertation, Internationales Hochschulinstitut Zittau, Zittau

Mitscherlich, G. (1981): Wald, Wachstum und Umwelt – Eine Einführung in die ökologischen Grundlagen des Waldwachstums. Band 2 – Waldklima und Wasserhaushalt. J. D. Sauerländer's Verlag, Fachverlag für Forstwissenschaft, Forstgenetik und Klassische Philologie, Frankfurt

Müller, M.; Schoenherr, J. I.; Al-Akel, S.; Engel, J.; Reuter, E. (2008): Nutzung von Böden und technischen Bodensubstraten in Deponieoberflächenabdichtungsmaßnahmen. Tagungsband, 2. Fachtagung Geotechnik an der HTW Dresden, Eigenverlag, Dresden, S. 165 - 186, ISSN1867-5883

Müller, M.; Schoenherr, J. I.; Al-Akel, S.; Engel, J. (2009): Langzeitorientierte Lysimeteruntersuchungen an Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten. In: Hochschule Zittau/Görlitz (Hrsg.): Deponieworkshop Zittau-Liberec 2009 – Anforderungen an Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten unter dem Einfluss des Klimawandels. Tagungsband, Wissenschaftliche Schriften des EU Ziel3/Cíl3-Projekts „Erdbau und Rekultivierung“, Heft 1, Zittau, S. 7 - 18, ISBN 978-3-9812655-4-5

Mueller, M.; Schoenherr, J. I.; Al-Akel, S.; Engel, J. (2009a): Research on surface liner and cover systems with long life spans in operating and closed landfills. In: Al Baath University (Hrsg.): Conference of Industry of Engineering Constructions Between Reality & Ambitions. Printed at Al Baath University, Homs (Syria), pp. 787 - 798

Müller, M.; Al-Akel, S.; Baloun, T. A.; Kammel, E.; Schoenherr, J.; Engel, J. (2009b): Wasserhaushaltsschichten zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altablagerungen Teil 1: Lysimeterbau und Ergebnisse. In: Ifz Raumberg Gumpenstein (Hrsg.): Lysimeter – Perspektiven in Forschung und Anwendung. Tagungsband, 13. Gumpensteiner Lysimeter-tagung, Eigenverlag, Irdning (Österreich), S. 147 - 150, ISBN 978-3-902559-31-9

Müller, M.; Schoenherr, J. I.; Al-Akel, S.; Engel, J. (2010): Entwurf und Planung von Wasserhaushaltsschichten – Neue Erkenntnisse und Empfehlungen für die Praxis. In: Hochschule Zittau/Görlitz (Hrsg.): Deponieworkshop Liberec - Zittau 2010 – Aktuelle Probleme der Abfallwirtschaft. Tagungsband, Wissenschaftliche Schriften des EU Ziel3/Cíl3-Projekts „Erdbau und Rekultivierung“, Heft 3, Zittau, S. 75 - 87, ISBN 978-80-7399-143-2

- Münnich, K. (2000):** Evaluierung des Wasserhaushalts von Siedlungsabfalldeponien. Müll und Abfall, Jg. 32 (11), S. 648 - 651, ISSN 0027-2957
- Neumann U. (1999):** Rekultivierungsanleitung. In: Hösel, G.; Billitewski, B.; Schenkel, W.; Schnurer, H. (Hrsg.): Müll-Handbuch. Beitrag 4622, E. Schmidt Verlag GmbH, Berlin, 1999
- Nydegger, R. (2010):** Die Kapillarsperre – 10 Jahre Messresultate bei zwei Testfeldern auf der Deponie Heinersgrund. In: Henken-Mellies, U. (Hrsg.): Weiterbetrieb sowie Abdichtung und Nachsorge; Umgang mit Ablagerungen. Tagungsband zum 21. Nürnberger Deponieseminar, Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts Nürnberg, Heft 89, Eigenverlag der LGA, Nürnberg, S. 71 - 80
- Nyhan, J. W. (2005):** A Seven-Year Water Balance Study of an Evapotranspiration Landfill Cover Varying in Slope for Semiarid Regions. Vadose Zone Journal, vol. 4 (3), pp. 466 - 480, ISSN 1539-1663
- Nyhan, J. W.; Hakonson, T. E.; Drennon, B. J. (2009):** A water balance study of two landfill cover designs for semiarid regions. J. Environ. Qual., vol. 19, pp. 281-288, ISSN 0047-2425
- Olbrisch, H.-D. (1975):** Untersuchungen zur Konsolidierung bei eingefüllten Lysimetern. Wasser & Boden, Band 27 (4), S. 85 - 90, ISSN 0043-0951
- Olschewski, O.; Pagels, B.; Baumgartl, T.; Irmeler, U.; Jensen, K.; Lamp, J.; Schütz, W.; Horn, R. (2001):** Untersuchungen zur Ökologie des Bodens, zur Vegetation und zur Fauna einer rekultivierten Mülldeponie. Wasser & Boden, Band 53 (6), S. 21 - 26, ISSN 0043-0951
- Otto, H.-J. (1994):** Waldökologie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- Parkin, G. W.; Roy, J. W.; Wagner-Riddle, C. (2000):** Water flow in Unsaturated Soil Below Turfgrass: Observations and LEACHM (with EXPRES) Predictions. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 64 (1), pp. 86 – 93, ISSN 0361-5995
- Petersen, A., (1988):** Die Gräser als Kulturpflanzen und Unkräuter auf Wiese, Weide und Acker. Verl. Akademie, Berlin
- Philip, J. R. (1957):** The Theory of Infiltration: 4. Sorptivity and Algebraic Infiltration Equations. Soil Sci., vol. 84 (3), pp. 257 - 264, ISSN 0038-075X
- Polomski, J.; Kuhn, N. (1998):** Wurzelsysteme. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Verlag Paul Haupt, Bern, Stuttgart, Wien
- Pott, R.; Hüppe, J. (2007):** Spezielle Geobotanik – Pflanze, Klima, Boden. Springer-Verlag GmbH, Heidelberg, Berlin
- Prantl, R.; Brandner, V. (2010):** Recommendations on Landfill Top Covers in Austria. In: Lorber, K. F.; Adam, J.; Aldrian, A.; Arnberger, A.; Benzama, A.; Kreindl, G.; Müller, P.; Sager, D.; Sarc, R.; Wruss, K. (Hrsg.): DepoTech 2010 – Abfallwirtschaft, Abfalltechnik, Deponietechnik und Altlasten. Tagungsband. 10. DepoTech-Konferenz, Eigenverlag des Instituts für nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik, Leoben (Österreich), S. 499 - 504, ISBN: 978-3-200-02018-4
- Prinz, H.; Strauß, R. (2006):** Abriss der Ingenieurgeologie. 4. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag Elsevier GmbH, München
- Qian, X.; Koerner, R. M.; Gray, D. H. (2001):** Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction. Published by Prentice Hall, Pearson Canada Inc., Toronto ISBN 978-0-13-012506-4
- Quandt, T.; Henneberg, M. (2011):** Deponierekultivierung mit gereiftem Baggergut am Beispiel der Siedlungsabfalldeponie Grimmen (M-V). In: Kilchert, M. (Hrsg.): 7. Leipziger Deponiefachtagung – Stilllegung, Nachsorge und Nachnutzung von Deponien. Tagungsband, Eigenverlag, Leipzig, S. 139 - 150

Reidenbach, G. (2008): Blühende Vielfalt am Straßenrand – Saatmischungen für das Straßenbegleitgrün. In: Lehr- und Versuchsanstalt Gartenbau Erfurt (Hrsg.): Garten- und Landschaftsbautag 2008. Tagungsband, d m z druckmedienzentrum, Erfurt, S. 49 - 61

Reiter, T.; Müller, J. (2007): Kombinationsabdichtung aus Kunststoffdichtungsbahnen und Qualifizierter Wasserhaushaltsschicht - Ein Pilotprojekt in Bayern zur Sicherung der Deponie Weiden-West. In: Egloffstein, T.; Burkhardt, G. (Hrsg.): Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten 2007 - Die integrierte Deponieverordnung - Endgültige Abkehr von der Regel-Oberflächenabdichtung hin zur Systemwirksamkeit? Welche Anforderungen sind an die Wirksamkeit und Langzeitbeständigkeit von Oberflächenabdichtungen zu stellen? Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten, Band 13, ICP-Eigenverlag Bauen und Umwelt, Karlsruhe, S. 125 - 153, ISBN 978-3-939662-01-3

Renger, M.; Strebel, O.; Giesel, W. (1974): Beurteilung bodenkundlicher, kulturtechnischer und hydrologischer Fragen mit Hilfe von klimatischer Wasserbilanz und bodenphysikalischen Kennwerten. Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung, Heft 15, S. 353 - 366, ISSN 0044-2984

Reubens, B.; Poesen, J.; Danjon, F.; Geudens, G.; Muys, B. (2007): The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. Trees, vol. 21 (4), pp. 385 - 402, ISSN 0931-1890

Reuter, E. (2007): Felduntersuchungen zum Zusammenwirken von Dichtungskomponenten mit instationärem Durchlässigkeitsverhalten. In: Hochschule Zittau/Görlitz (Hrsg.): Deponieworkshop Zittau-Liberec 2007 - Einsatzgrenzen, Sanierung und Wirtschaftlichkeit von Deponiesicherungsvarianten. Tagungsband, Wissenschaftliche Berichte der Hochschule Zittau/Görlitz, Heft 96, Eigenverlag, Zittau, S. 67 - 80, ISBN 978-3-9811021-6-1

Reynolds, T. D.; Leslie, F. J. (1989): Root profiles of some native and exotic plant species in Southeastern Idaho. Environ. Exp. Bot., vol. 29 (2), pp. 241 - 248, ISSN 0098-8472

Richter, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194, Eigenverlag, Offenbach

Rieger-Hoffmann.de (2010): Saatgutmischungen. <http://www.rieger-hoffmann.de/03_mischungen/frameset_mischungen.html>; recherchiert am, 23.07.2010

Robinson, D. (1994): The responses of plants to non-uniform supplies of nutrients. New Phytol., vol. 127 (4), pp. 635 - 674, ISSN 0028-646X

Robinson, G. R.; Handel, S. N. (1995): Woody plant roots fail to penetrate a clay-lined landfill: Management implications. Environ. Manage., vol. 19 (1), pp. 57 - 64, ISSN 1432-1009

Roesler, A. C.; Benson, C. H.; Albright, W. H. (2002): Field Hydrology and Model Predictions for Final Covers in the Alternative Assessment Program – 2002. Geo Engineering Report No. 02-08, Homeprint, Desert Research Institut, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin (USA)

Rothstein, H. (1995): Ökologischer Landschaftsbau – Grundlagen und Maßnahmen. Eugen Ulmer GmbH, Stuttgart

Rowell, D. L. (1997): Bodenkunde, Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York

Rudert, J. (1971): Beitrag zur Bedeutung bodenmechanischer Klassifikationswerte, Dissertation, TU Dresden, Dresden

Rudert, J. (1977): Beitrag zur quantitativen Erfassung der Abhängigkeit mechanischer Eigenschaften feinkörnig - bindiger Lockergesteine von Lockergesteinsart und Phasenzusammensetzung, Habilitation, TU Dresden, Dresden

Saaten-Zeller.de (2010): Saatgutmischungen. <http://www.saaten-zeller.de/rel/images/Saaten-Zeller_Standardkatalog.pdf>, recherchiert am 23.07.2010

Sänger, F. (2010): Praktische aber auch offene Fragen im Zusammenhang mit der DepV 2009. In: Egloffstein, T.; Burkhardt, G. (Hrsg.): Die Umsetzung der neuen Deponieverordnung – Praktische Erfahrungen im Vollzug und erste Änderungsverordnung zur neuen DepV. Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten, Band 19, ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Karlsruhe, S. 189 - 200, ISBN 978-3-939662-08-2

Sänger, H.; Wöllner, S. (1995): Beitrag zur Flora und Vegetation von Bergehalden des Uranerzbergbaues im Schlema-Alberodaer Revier. Sächs. Florist. Mitteilungen, Heft 3, S. 81-114, ISSN 1432-3990

Scanlon, B. R.; Reedy, R. C.; Keese, K. E.; Dwyer, S. F. (2005): Evaluation of Evapotranspirative Covers for Waste Containment in Arid and Semiarid Regions in the Southwestern USA. Vadose Zone Journal, vol. 4, pp. 55 - 71, ISSN 1539-1663

Schaarschmidt, G. (1974): Zur ingenieurb biologischen Sicherung von Straßenböschungen durch Bewuchs und Lebendverbau. Dissertation, Fakultät für Bauwesen, RWTH Aachen, Aachen

Schaber-Schoor, G. (2005): Planung und Gestaltung von Gehölzbewuchs auf Deponien. In: Institut für Landespflege der Universität Freiburg (Hrsg.): Qualifizierte Rekultivierungsschichten – Berichte aus der Forschung und Erfahrungen aus der Praxis. Tagungsband, Eigenverlag, Böblingen, S. 74 - 91

Schatz, S. (2010): Verwertung von Abfällen als Deponieersatzbaustoffe - Einsatzmöglichkeiten, Fremdüberwachung, Praxisbeispiele. In: KUMAS e. V. (Hrsg.): 11. Bayerische Abfall- und Deponietage 2010. Eigenverlag, Augsburg, R15 S. 1 - 19

Scheer, T. (2001): Rekultivierung Rückstandshalten der Kaliindustrie - Untersuchungen zur Nutzbarkeit aufbereiteter Salzschlacke der Sekundäraluminium-Industrie als Rekultivierungsmaterial einer Kali-Rückstandshalte. Dissertation im Fachgebiet Landschaftsökologie und Naturschutz, Universität Kassel, Kassel

Scheffer, F.; Schachtschabel, P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg, Berlin

Schmeisky, H.; Hofmann, H. (2002): Sickerwasserregulierung von Deponieflächen durch Vegetationsdecken. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Restabfallbehandlung VI. Neues aus Forschung und Praxis. Institut an der Universität Kassel, Verlag Witzenhausen, Kassel, S. 806 - 820, ISBN: 3-928673-38-6

Schmeisky, H.; Hofmann, H. (2005): Etablierung von Vegetationsbeständen auf Rekultivierungsschichten von Deponien. Expertenrunde „Rekultivierungs-/Wasserhaushaltsschichten als mögliches Sicherungselement für Deponien“, Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Eigenverlag, Halle

Schmidt, R. (1995): Östliche Oberlausitz. In: Mannsfeld, K.; Richter, H. (Hrsg.): Naturräume in Sachsen. Forschungen zur deutschen Landeskunde, Band 238, Eigenverlag des Zentralausschusses für deutsche Landeskunde, Trier, S. 146 - 150, ISBN: ISBN 3-88143-049-0

Schneider, P.; Nindel, K.; Zaddach, V.; Forster, M.; Piewak, M. (1999): Wasserhaushalt der Halde Schlüsselgrund des Sanierungsgebietes Königstein – Lösungsansatz, messtechnische Untersuchung zur Kalibrierung des Modells und computergestützte Modellierung mit dem Programm HELP. Terra Nostra. Heft 99/1, ISSN 0946-8978

Schneider, P.; Meinrath, G.; Merkel, B.; Delakowitz, B. (2003): Kriterien für die Datenbasis für die Langzeitsicherheitsanalyse von Endlagern. Bericht an das Bundesamt für Strahlenschutz (unveröffentlicht)

Schneider, P. (2005): Alternative Methoden in der Bergbausanierung – Konzeption von reaktiven Abdecksystemen am Beispiel der Halde Schlüsselgrund. Dissertation, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg

Schneider, P.; Schaffrath, M.; Hoepfner, U.; Barnekow, U. (2006): Langzeitprognose des Wasserhaushaltes von alternativen Abdecksystemen am Standort der IAA Helmsdorf, Sachsen. In: Hochschule Zittau/Görlitz (Hrsg.): Deponieworkshop Zittau-Liberec 2006 – Langzeitverhalten von Deponieabdichtungen. Tagungsband, Wissenschaftliche Berichte der Hochschule Zittau/Görlitz, Heft 91, Eigenverlag, Zittau, S. 275 - 288, ISBN 978-3-9811021-3-0

Schneider, P.; Oswald, K.-D.; Gottschalk, N. (2010): Internationale Erfahrungen mit der Planung und dem Bau von Deponieabdichtungen – das Problem der Zwischenabdeckung. In: Hochschule Zittau/Görlitz (Hrsg.): Deponieworkshop Liberec - Zittau 2010 – Aktuelle Probleme der Abfallwirtschaft. Tagungsband, Wissenschaftliche Schriften des EU Ziel3/Cíl3-Projekts „Erdbau und Rekultivierung“, Heft 3, Zittau, S. 111 - 119, ISBN 978-80-7399-143-2

Schoenherr, J. I.; Müller, M.; Baumert, R.; Lippmann-Pipke, J.; Seidler, C.; Sängner, F.; Deutsch, K.; Schneider P.; Bartusch, K.; Kosteletzky, G.; Werner, H. (2005): Entwicklung eines methodischen Verfahrensansatzes zur Erstellung von Gleichwertigkeitsnachweisen für Deponieabdichtungen in Sachsen; Bericht zum BMBF-Forschungsprojekt: 01707003, Zittau

Schoenherr, J. I.; Engel, J.; Müller, M.; Al-Akel, S.; Sängner, F.; Seidler, C.; Diesterheft, H.; Werner, H.; Kosteletzky, G.; Keßler, J. (2011): Wasserhaushaltsschichten zur Oberflächensicherung von Deponien und Altablagerungen. Abschlussbericht zu einem BMBF-Verbundforschungsprojekt, FKZ: 1744A06 und 1744B06, Zittau, Dresden

Schrödter, H. (1985): Verdunstung - Anwendungsorientierte Messverfahren und Bestimmungsmethoden. Springer Verlag GmbH, Heidelberg

Schubert, S. (2006): Pflanzenernährung Grundwissen-Bachelor. Verlag Eugen Ulmer KG, Stuttgart

Schuppener, B. (1993): Standsicherheit bei durchwurzelten Uferböschungen. BINNENSCHIFFFAHRT – ZfB, Heft 9, S. 18-23, ISSN 0939-1916

Seidler, C. (1998): Ursachen und Charakterisierung eines eingeschränkten Wasserhaushalts sowie seine Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum. Dissertation, Internationales Hochschulinstitut Zittau, Zittau

Simon, F.-G.; Müller, W. W. (2004): Standard and alternative landfill capping design in Germany. Env. Sci. and Policy, vol. 7 (4), pp. 277 - 290, ISSN 1462-9011

Sinn, G. (1982): Wurzelsystem der Straßenbäume - eine Literaturlauswertung. Das Gartenamt 31, S. 241 - 244, ISSN 0948-9770

SMUL (Hrsg.) (2005): Klimawandel in Sachsen – Sachstand und Ausblick. 1. Auflage, Eigenverlag, Dresden

SMUL – Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (Hrsg.) (2008): Sachsen im Klimawandel – Eine Analyse. Druckerei Thieme & Co. KG, Dresden

SMUL.de (2010): Saatgutmischungen. <http://www.smul.sachsen.de/lfl/publikationen/download/4856_1.pdf>, recherchiert am 14.12.2010

Sokollek, V.; Melchior, S.; Berger K.; Steinert B. (2006): Achtzehn Jahre Testfelduntersuchungen auf der Deponie Georgswerder/Hamburg. In: Hochschule Zittau/Görlitz (Hrsg.): Deponieworkshop Zittau-Liberec 2006 – Langzeitverhalten von Deponieabdichtungen. Tagungsband, Wissenschaftliche Berichte der Hochschule Zittau/Görlitz, Heft 91, Eigenverlag, Zittau, S. 221 - 238, ISBN 3-9811021-3-4

Sondermann, W. D.; Hejma, B. (2004): Rechtliche Abgrenzung von Altablagerungen und Deponien. In: Dresdner Grundwasserforschungszentrum e. V. (Hrsg.): XV. Sächsisches Altlastenkolloquium - Altablagerungen und Deponiestilllegung. Saxoprint GmbH, Dresden, S. 2/1 - 2/6

Stock, U. (2009): Der Einsatz von Wasserhaushaltsschichten bei Genehmigungsverfahren. Plenarvortrag, Expertengesprächsrunde „Wasserhaushaltsschichten im Deponiebau“, Potsdam, 25.11.2009, <<http://www.mugv.brandenburg.de/vortraege/deponiebau/v3.pdf>>, recherchiert am 09.11.2010

Stock, U. (2010): Fachliche Fragestellungen bei der Genehmigung von Wasserhaushaltsschichten an Stelle von Abdichtungskomponenten nach Anhang 1. Nr. 2.3 Deponieverordnung. In: Egloffstein, T.; Burkhardt, G. (2010): Die Umsetzung der neuen Deponieverordnung - Praktische Erfahrungen im Vollzug und erste Änderungsverordnung zur neuen DepV. ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Karlsruhe, S. 257 - 266, ISBN 978-3-939662-08-2

Tauchnitz, S. J. (2007): Untersuchungen zum Wasserhaushalt und Stickstoffumsatz von Rekultivierungsschichten aus Klärschlammkomposten. Dissertation, Institut für Agrartechnik und Landeskultur der Landwirtschaftlichen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle/Saale

TLUG – Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (2002) (Hrsg.): Studie - Untersuchungen zur Langzeitverhalten von Oberflächenabdichtungen von Hausmülldeponien. <http://www.uni-weimar.de/cms/uploads/media/Studie_TLUG_safe.pdf>, recherchiert am 07.02.2011

Tresselt, K.; Miehlich, G.; Groengroeft, A.; Melchior, S.; Berger, K.; Harms, C. (1998): Harbour sludge as barrier material in landfill cover systems. Wat. Sci. Tec., vol. 37 (6/7), pp. 307 - 313, ISSN 0273-1223

Veihmeyer F. J.; Hendrickson, A. H. (1948): Soil density and root penetration. Soil Sci., vol. 65 (6), pp. 487 - 494, ISSN 1435-0661

Wagner, J.-F.; Schnatmeyer, C. (2002): Test field study of different cover sealing systems for industrial dumps and polluted sites. Appl. Clay Sci., vol. 21 (1/2), pp. 99 - 116, ISSN 0169-1317

Warren, R. W.; Hakonson, T. E.; Bostick, K. V. (1996): Choosing the most effective hazardous waste landfill cover. Remediation Journal, vol. 6 (2), S. 23 - 41, ISSN: 1520-6831

Wattendorf, P. (2001): Anforderungen an die Bepflanzung von Deponien aus deponietechnischer, forstwirtschaftlicher und landespflegerischer Sicht – eine Gratwanderung zwischen landespflegerischen Zielen und der langfristigen Sicherung des Deponiebauwerks. In: Maier-Harth, U. (Hrsg.): Oberflächenabdichtung und Rekultivierung von Deponien. 4. Deponieseminar des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz, Eigenverlag, Mainz, S. 213 - 226

Wattendorf, P.; Sokollek, V. (2003): Gestaltung und Entwicklung des Bewuchses auf Rekultivierungsschichten von Deponien und Altlasten. In: Schanz, T.; Witt, K. J. (Hrsg.): 1. Symposium Umweltgeotechnik. Schriftenreihe Geotechnik der Bauhaus-Universität Weimar, Heft 10, Band 1, Blueprint kopie-druck-medien, Weimar, S. 171 - 183, ISBN 3-86068-199-0

Wattendorf, P. (2009): Die Leistungsfähigkeit von Wasserhaushaltsschichten - Heute und in Zukunft. In: Hochschule Zittau/Görlitz (Hrsg.): Deponieworkshop Zittau-Liberec 2009 – Anforderungen an Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten unter dem Einfluss des Klimawandels. Tagungsband, Wissenschaftliche Schriften des EU Ziel3/Cíl3-Projekts „Erdbau und Rekultivierung“, Heft 1, Zittau, S. 35 - 48, ISBN 978-3-9812655-4-5

Weaver, J. E. (1926): Root Development of field groups. First Edition, McGraw-Hill Book Company, Inc., London

Wendling, U. (1995): Berechnung der Gras-Referenzverdunstung mit der FAO PENMAN-MONTEITH-Beziehung. Wasserwirtschaft, Jg. 85 (12), S. 602 - 604, ISSN 0043-0978

Wiersum, L. K. (1958): Density of root branching as affected by substrate and separate ions. Acta Bot. Neerland., vol. 7, pp. 174 - 190, ISSN 0044-5983

Wilke, B.-M. (2010): Abfallbelastung und Entsorgungsplanung I – Teil 3: Planung und Rekultivierung. <http://www2.abfallbelastung.tu-berlin.de/_downloads_lehre/abfallbelastung_und_entsorgungsplanung_4_planung_rekultivierung.pdf>, recherchiert am 20.07.2010

Wimmer, B.; Neugschwandtner, R.; Fritz, I.; Rauber, J.; Gerzabek, M. H.; Reichenauer, T. G. (2006): Evapotranspirationsschichten zur Abdeckung von Altablagerungen. In: Gerzabek, M. H.; Reichenauer, T. G. (Hrsg.): Innovative in-situ Methoden zur Sicherung und Sanierung von Altablagerungen und Altstandorten. Facultas Verlags- und Buchhandels AG, Wien, S. 3 - 70, ISBN 978-3-85076-772-9

Witt, K. J.; Ramke, H.-G. (2003): Empfehlungen des Arbeitskreises 6.1 "Geotechnik der Deponiebauwerke" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT). Bautechnik, Jg. 80 (9), S. 565 - 579, ISSN 1437-0999

Witt, K. J.; Zeh, R. M. (2004): Maßnahmen gegen Trockenrisse in mineralischen Abdichtungen. In: Kranert (Hrsg.): Zeitgemäße Deponietechnik 2004. Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 81, März 2004, S. 83-98, ISBN 3-486-27102-4

Witt, K. J.; Ramke, H.-G. (2006): Empfehlungen des Arbeitskreises 6.1 "Geotechnik der Deponiebauwerke" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT). Bautechnik, Jg. 83 (9), S. 585 - 596, ISSN 1437-0999

Witt, K. J.; Ramke, H.-G. (2008): Empfehlungen des Arbeitskreises 6.1 "Geotechnik der Deponiebauwerke" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT). Bautechnik, Jg. 85 (9), S. 573 - 577, ISSN 1437-0999

Witt, K. J. (2009): Die Standsicherheit im Lebenszyklus von Oberflächenabdichtungssystemen. In: SKZ – ConSem GmbH (Hrsg.): Die sichere Deponie 2009 – Abdichtung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen. Tagungsband, 25. Fachtagung, Eigenverlag, Würzburg, S. B 1 - B 22

WMO – World Meteorological Organization (Hrsg.) (2008): Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. 7. Edition, Publications Board World Meteorological Organization, Geneva (Schweiz), ISBN 978-92-63-100085

Wolsfeld, N. (2005): Bodenphysikalische Eignung mineralischer Oberflächenabdichtungssysteme für Monodeponien der Stahlindustrie. Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen, Heft 43, Citydruck GmbH, Freiburg

Wudtke, R.-B.; Werth, K.; Witt, K. J. (2008): Nachweis der Standsicherheit von Oberflächenabdichtungen nach dem Teilsicherheitskonzept. In: Egloffstein, T.; Burkhardt, G. (Hrsg.): Sanierung, Nachsorge und Folgenutzung von Deponien – Die neue Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts – aktueller Stand der Diskussion und Umsetzung. Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten, Band 15, ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Karlsruhe, S. 13 - 28, ISBN 978-3-939662-04-4

Xie, M. (2003): Untersuchungen zur Verwertung von Abfällen in Abdichtungssystemen für Deponien und Altablagerungen. Trierer Geologischen Arbeiten, Band 6, Eigenverlag des Lehrstuhls für Geologie der Universität Trier, Trier

Yang, M.; Yanful, E. K. (2002): Water balance during evaporation and drainage in cover soils under different water table conditions. Adv. Environ. Res., Vol. 6 (4), pp. 505 - 521, ISSN 1093-0191

Zeh, R. M.; Witt, K. J. (2002): Water balance models and programmes - Comparisons and calculation results. In De Mello & Almeida (Hrsg.): Environmental Geotechnics. Proceeding, 4th. International Congress Environmental Geotechnics, Rio de Janeiro, A.A. Balkema Publishers, vol. 1, pp.113 – 118, ISBN 978-9058095015

Zenker, T. (2003): Verdunstungswiderstände und Gras-Referenzverdunstung – Lysimeteruntersuchungen zum PENMAN-MONTEITH-Ansatz im Berliner Raum. Dissertation, Fakultät VII – Architektur, Umwelt und Gesellschaft, Technischen Universität Berlin, Berlin

Zornberg, J. G.; LaFountain, L.; Caldwell, J. A. (2003): Analysis and Design of Evapotranspirative Cover for Hazardous Waste Landfill. J. Geotech. Geoenviron. Eng., vol. 129 (5), pp. 427 - 438, ISSN 1090-0241

Zou, Y. (2004): Ein erweitertes physikalisches Modell der pF-Kurve für teilgesättigte grobkörnige Böden. Bautechnik, Jg. 81 (5), S. 371 - 378, ISSN 1437-0999

Versicherung an Eides statt

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich keine Unterstützungsleistungen erhalten.

Weitere Personen waren an der Abfassung der Arbeit nicht beteiligt. Die Hilfe eines Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Weitere Personen haben von mir keine geldwerten Leistungen für die Arbeit erhalten, die nicht als solche kenntlich gemacht worden sind.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Zittau, den 9. März 2011

Anlagen

zur Dissertation

**„Wasserhaushaltsschichten als Bestandteil von
Deponieoberflächenabdichtungssystemen“**

von

Dipl.-Ing. (FH) Mario Müller

Anlagenverzeichnis

Anlage 1:	Proctorkurven zu den Böden der Lysimeterstation	
	Bautzen/Nadelwitz	IV
Anlage 1.1:	Proctorkurve des Oberbodens	V
Anlage 1.2:	Proctorkurve des bindigen Bodens	VI
Anlage 1.3:	Proctorkurve des gemischtkörnigen Bodens	VII
Anlage 2:	Zusammensetzung der Gras-/Kräuter – Saatgutmischungen	VIII
Anlage 2.1:	Saatgutmischung A	IX
Anlage 2.2:	Saatgutmischung B	X
Anlage 2.3:	Saatgutmischung C	XI
Anlage 2.4:	Saatgutmischung D	XII
Anlage 2.5:	Saatgutmischung E	XIII
Anlage 2.6:	Saatgutmischung F	XIV
Anlage 2.7:	Saatgutmischung G	XIV
Anlage 2.8:	Saatgutmischung H	XIV
Anlage 2.9:	Saatgutmischung I	XV
Anlage 2.10:	Saatgutmischung J	XV
Anlage 2.11:	Saatgutmischung K	XVI
Anlage 2.12:	Saatgutmischung L	XVI
Anlage 2.13:	Saatgutmischung M	XVII
Anlage 2.14:	Saatgutmischung N	XVII
Anlage 2.15:	Saatgutmischung O	XVII
Anlage 2.16:	Saatgutmischung P	XVIII
Anlage 2.17:	Saatgutmischung Q	XVIII
Anlage 2.18:	Saatgutmischung R	XIX
Anlage 2.19:	Saatgutmischung S	XX
Anlage 2.20:	Saatgutmischung T	XXI
Anlage 2.21:	Saatgutmischung U	XXII
Anlage 2.22:	Saatgutmischung V	XXII
Anlage 2.23:	Saatgutmischung W	XXIII
Anlage 2.24:	Saatgutmischung X	XXIII
Anlage 2.25:	Saatgutmischung Y	XXIV
Anlage 2.26:	Saatgutmischung Z	XXIV
Anlage 2.27:	Saatgutmischung AA	XXV
Anlage 2.28:	Saatgutmischung AB	XXVI
Anlage 2.29:	Saatgutmischung AC	XXVI

Anlage 3:	Ebenen des Feinbodenartendiagramms nach KA5	XXVII
Anlage 3.1:	Ebene „Nutzbare Feldkapazität“	XXVIII
Anlage 3.1-1:	Ebene „Nutzbare Feldkapazität im Bereich der Trockendichte $1,2 \leq \rho_d < 1,4 \text{ g/cm}^3$	XXIX
Anlage 3.1-2:	Ebene „Nutzbare Feldkapazität im Bereich der Trockendichte $1,4 \leq \rho_d < 1,6 \text{ g/cm}^3$	XXX
Anlage 3.1-3:	Ebene „Nutzbare Feldkapazität im Bereich der Trockendichte $1,6 \leq \rho_d \leq 1,8 \text{ g/cm}^3$	XXXI
Anlage 3.2:	Ebene „Durchwurzelung“	XXXII
Anlage 3.2-1:	Ebene „Durchwurzelung“ für die Mischung A	XXXIII
Anlage 3.2-2:	Ebene „Durchwurzelung“ für die Mischungen B - M	XXXIV
Anlage 3.2-3:	Ebene „Durchwurzelung“ für die Mischungen N - O	XXXV
Anlage 3.2-4:	Ebene „Durchwurzelung“ für die Mischungen P - S	XXXVI
Anlage 3.2-5:	Ebene „Durchwurzelung“ für die Mischungen T - W	XXXVII
Anlage 3.2-6:	Ebene „Durchwurzelung“ für die Mischung X	XXXVIII
Anlage 3.2-7:	Ebene „Durchwurzelung“ für die Mischung Y	XXXIX
Anlage 3.2-8:	Ebene „Durchwurzelung“ für die Mischung Z	XL
Anlage 3.2-9:	Ebene „Durchwurzelung“ für die Mischung AA	XLI
Anlage 3.2-10:	Ebene „Durchwurzelung“ für die Mischung AB	XLII
Anlage 3.2-11:	Ebene „Durchwurzelung“ für die Mischung AC	XLIII
Anlage 3.2-12:	Ebene „Durchwurzelung“ für Sträucher	XLIV
Anlage 3.2-13:	Ebene „Durchwurzelung“ für Nadelbäume	XLV
Anlage 3.2-14:	Ebene „Durchwurzelung“ für Laubbäume	XLVI
Anlage 3.3:	Ebene „Standssicherheit“	XLVII
Anlage 3.3-1:	Ebene „Standssicherheit“ für die Randbedingungen Böschungsneigung 1:2, Böschungslänge: 30 und 80 m und Schichtmächtigkeit: 1,5 und 2,0 m	XLVIII
Anlage 3.3-2:	Ebene „Standssicherheit“ für die Randbedingungen Böschungsneigung 1:3, Böschungslänge: 80 m und Schichtmächtigkeit: 1,5 und 2,0 m	XLIX
Anlage 3.3-3:	Ebene „Standssicherheit“ für die Randbedingungen Böschungsneigung 1:3, Böschungslänge: 30 m und Schichtmächtigkeit: 1,5 und 2,0 m	L
Anlage 4:	Graphische Nachweise der Standssicherheitsuntersuchungen für ausgewählte Bodenarten bei definierten Randbedingungen	LI
Anlage 4.1:	Bodenart: Sand	LII
Anlage 4.1-1:	Graphischer Nachweis der Standssicherheitsuntersuchung: Bodenart: Sand, Böschungsneigung: 1:2; Böschungslänge: 30 m Schichtmächtigkeit: 1,5 m	LIII
Anlage 4.1-2:	Graphischer Nachweis der Standssicherheitsuntersuchung: Bodenart: Sand, Böschungsneigung: 1:2; Böschungslänge: 30 m Schichtmächtigkeit: 2,0 m	LIV
Anlage 4.1-3:	Graphischer Nachweis der Standssicherheitsuntersuchung: Bodenart: Sand, Böschungsneigung: 1:2; Böschungslänge: 80 m Schichtmächtigkeit: 1,5 m	LV
Anlage 4.1-4:	Graphischer Nachweis der Standssicherheitsuntersuchung: Bodenart: Sand, Böschungsneigung: 1:2; Böschungslänge: 80 m Schichtmächtigkeit: 2,0 m	LVI

Anlage 4.1-5:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Sand, Böschungsneigung: 1:3; Böschungslänge: 30 m Schichtmächtigkeit: 1,5 m	LVII
Anlage 4.1-6:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Sand, Böschungsneigung: 1:3; Böschungslänge: 30 m Schichtmächtigkeit: 2,0 m	LVIII
Anlage 4.1-7:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Sand, Böschungsneigung: 1:3; Böschungslänge: 80 m Schichtmächtigkeit: 1,5 m	LIX
Anlage 4.1-8:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Sand, Böschungsneigung: 1:3; Böschungslänge: 80 m Schichtmächtigkeit: 2,0 m	LX
Anlage 4.2:	Bodenart: Lehm	LXI
Anlage 4.2-1:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Lehm, Böschungsneigung: 1:2; Böschungslänge: 30 m Schichtmächtigkeit: 1,5 m	LXII
Anlage 4.2-2:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Lehm, Böschungsneigung: 1:2; Böschungslänge: 30 m Schichtmächtigkeit: 2,0 m	LXIII
Anlage 4.2-3:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Lehm, Böschungsneigung: 1:2; Böschungslänge: 80 m Schichtmächtigkeit: 1,5 m	LXIV
Anlage 4.2-4:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Lehm, Böschungsneigung: 1:2; Böschungslänge: 80 m Schichtmächtigkeit: 2,0 m	LXV
Anlage 4.2-5:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Lehm, Böschungsneigung: 1:3; Böschungslänge: 30 m Schichtmächtigkeit: 1,5 m	LXVI
Anlage 4.2-6:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Lehm, Böschungsneigung: 1:3; Böschungslänge: 30 m Schichtmächtigkeit: 2,0 m	LXVII
Anlage 4.2-7:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Lehm, Böschungsneigung: 1:3; Böschungslänge: 80 m Schichtmächtigkeit: 1,5 m	LXVIII
Anlage 4.2-8:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Lehm, Böschungsneigung: 1:3; Böschungslänge: 80 m Schichtmächtigkeit: 2,0 m	LXIX
Anlage 4.3:	Bodenart: Schluff	LXX
Anlage 4.3-1:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Schluff, Böschungsneigung: 1:2; Böschungslänge: 30 m Schichtmächtigkeit: 1,5 m	LXXI
Anlage 4.3-2:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Schluff, Böschungsneigung: 1:2; Böschungslänge: 30 m Schichtmächtigkeit: 2,0 m	LXXII
Anlage 4.3-3:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Schluff, Böschungsneigung: 1:2; Böschungslänge: 80 m Schichtmächtigkeit: 1,5 m	LXXIII

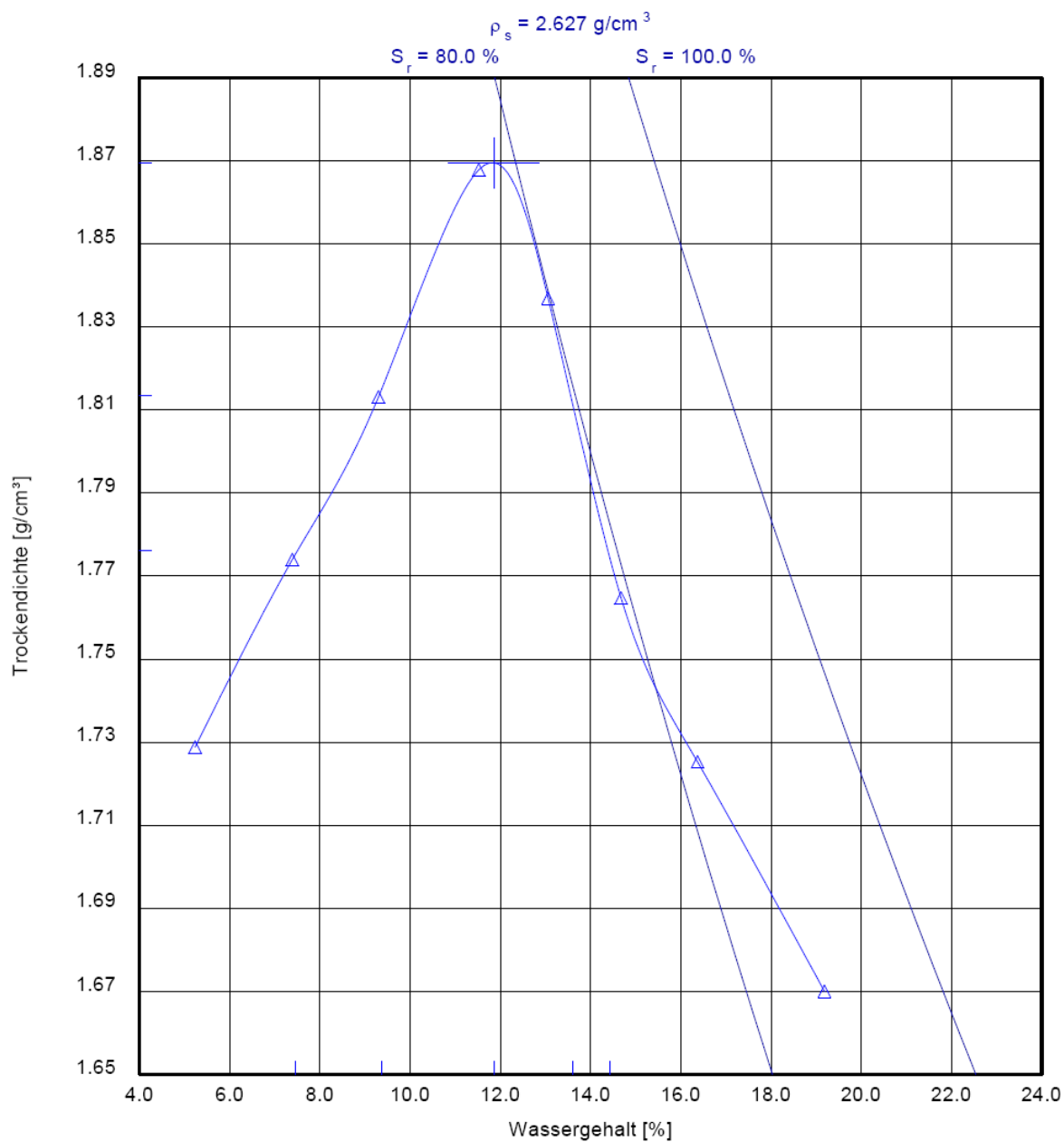
Anlage 4.3-4:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Schluff, Böschungsneigung: 1:2; Böschungslänge: 80 m Schichtmächtigkeit: 2,0 m	XXIV
Anlage 4.3-5:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Schluff, Böschungsneigung: 1:3; Böschungslänge: 30 m Schichtmächtigkeit: 1,5 m	LXXV
Anlage 4.3-6:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Schluff, Böschungsneigung: 1:3; Böschungslänge: 30 m Schichtmächtigkeit: 2,0 m	LXXVI
Anlage 4.3-7:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Schluff, Böschungsneigung: 1:3; Böschungslänge: 80 m Schichtmächtigkeit: 1,5 m	LXXVII
Anlage 4.3-8:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Schluff, Böschungsneigung: 1:3; Böschungslänge: 80 m Schichtmächtigkeit: 2,0 m	LXXVIII
Anlage 4.4:	Bodenart: Ton	LXXIX
Anlage 4.4-1:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Ton, Böschungsneigung: 1:2; Böschungslänge: 30 m Schichtmächtigkeit: 1,5 m	LXXX
Anlage 4.4-2:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Ton, Böschungsneigung: 1:2; Böschungslänge: 30 m Schichtmächtigkeit: 2,0 m	LXXXI
Anlage 4.4-3:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Ton, Böschungsneigung: 1:2; Böschungslänge: 80 m Schichtmächtigkeit: 1,5 m	LXXXII
Anlage 4.4-4:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Ton, Böschungsneigung: 1:2; Böschungslänge: 80 m Schichtmächtigkeit: 2,0 m	LXXXIII
Anlage 4.4-5:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Ton, Böschungsneigung: 1:3; Böschungslänge: 30 m Schichtmächtigkeit: 1,5 m	LXXXIV
Anlage 4.4-6:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Ton, Böschungsneigung: 1:3; Böschungslänge: 30 m Schichtmächtigkeit: 2,0 m	LXXXV
Anlage 4.4-7:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Ton, Böschungsneigung: 1:3; Böschungslänge: 80 m Schichtmächtigkeit: 1,5 m	LXXXVI
Anlage 4.4-8:	Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung: Bodenart: Ton, Böschungsneigung: 1:3; Böschungslänge: 80 m Schichtmächtigkeit: 2,0 m	LXXXVII

Anlage 1:

Proctorkurven zu den Böden der Lysimeterstation Bautzen/Nadelwitz

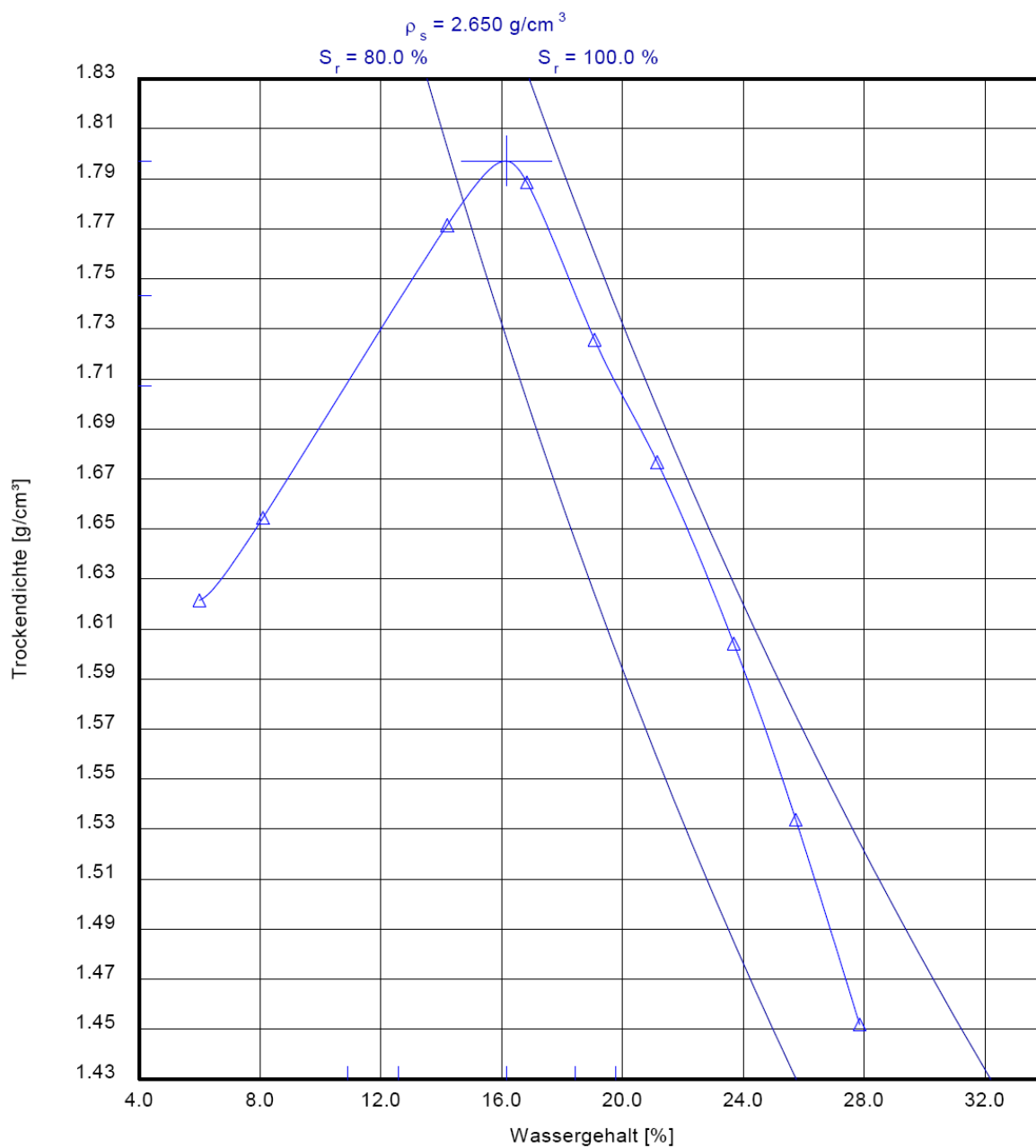
Anlage 1-1

Proctorkurve des Oberbodens



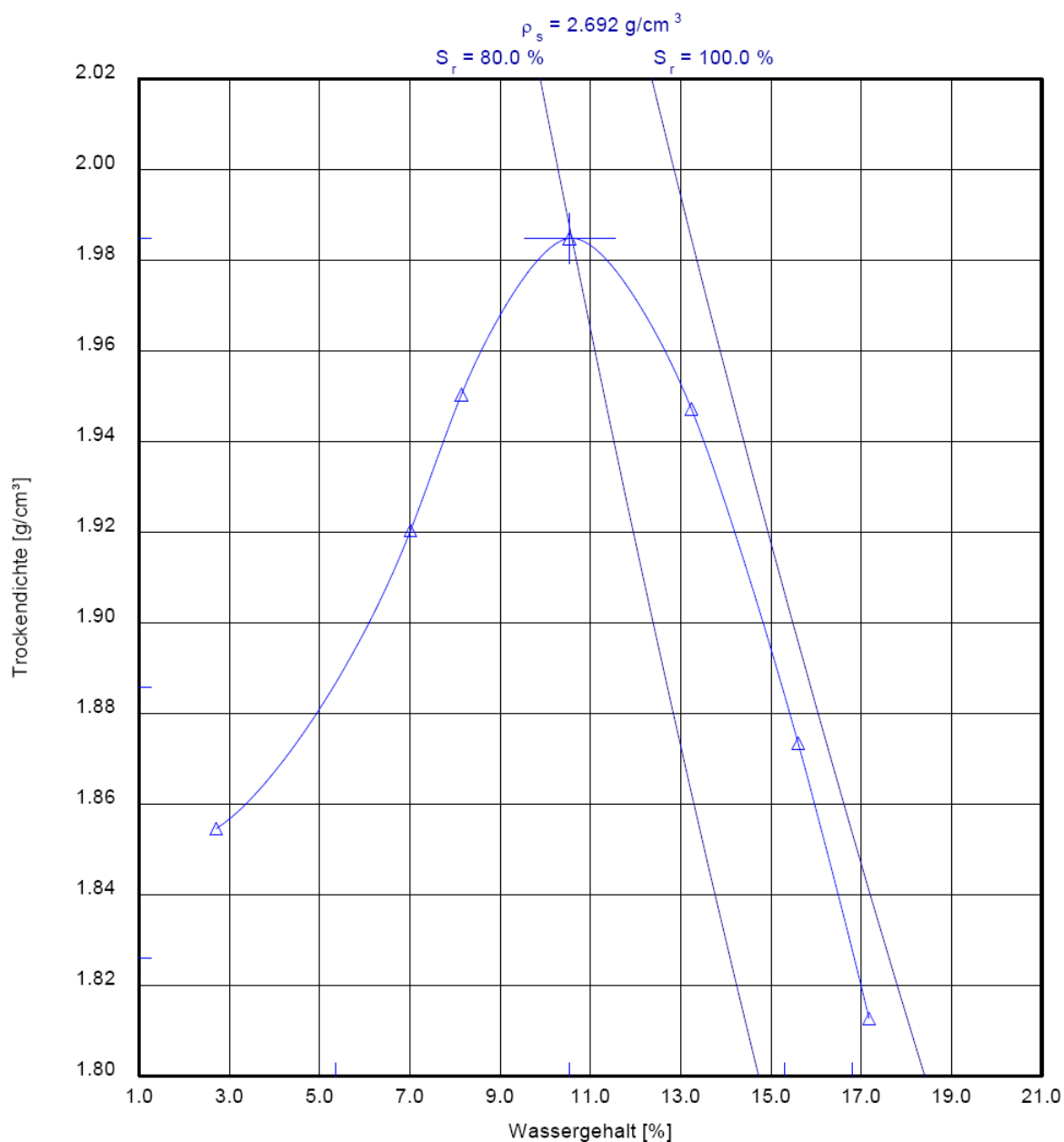
Anlage 1-2

Proctorkurve des bindigen Bodens



Anlage 1-3

Proctorkurve des gemischtkörnigen Bodens



Anlage 2:

Zusammensetzung der Gras-/Kräuter - Saatgutmischungen

Anlage 2-1

Saatgutmischung A Straßenbegleitgrün Nord 2010-11 Rieger-Hofmann GmbH; Raboldshausen

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Achillea millefolium</i>	Gemeine Schafgarbe
<i>Campanula rotundifolia</i>	Rundblättrige Glockenblume
<i>Centaurea cyanus</i>	Korn-/Flockenblume
<i>Centaurea jacea</i>	Wiesen-Flockenblume
<i>Cichorium intybus</i>	Gewöhnliche Wegwarte
<i>Daucus carota</i>	Wilde Möhre
<i>Galium album</i>	Wiesenlabkraut
<i>Hypericum perforatum</i>	Echte Johanniskraut
<i>Hypochoeris radicata</i>	Gewöhnliches Ferkelkraut
<i>Knautia arvensis</i>	Acker-Witwenblume
<i>Leontodon autumnalis</i>	Herbst-Löwenzahn
<i>Leucanthemum ircutianum</i>	Fettwiesen-Margerite
<i>Lotus corniculatus</i>	Gewöhnliche Hornklee
<i>Medicago lupulina</i>	Hopfenklee
<i>Papaver dubium</i>	Saat-Mohn
<i>Pastinaca sativa</i>	Pastinak
<i>Plantago lanceolata</i>	Spitzwegerich
<i>Prunella vulgaris</i>	Gewöhnliche Braunelle
<i>Rumex acetosa</i>	Wiesen-Sauerampfer
<i>Rumex acetosella</i>	Kleine Sauerampfer
<i>Silene dioica</i>	Rote Lichtnelke
<i>Silene vulgaris</i>	Taubenkropf-Leimkraut
<i>Torilis japonica</i>	Gewöhnliche Klettenkerbel
<i>Agrostis capillaris (tenuis)</i>	Rote Straußgras
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	Gewöhnliches Ruchgras
<i>Bromus erectus</i>	Aufrechte Trespe
<i>Cynosurus cristatus</i>	Wiesen-Kammgras
<i>Festuca nigrescens</i>	Horst-Rot-Schwingel
<i>Festuca ovina</i>	Echter Schaf-Schwingel
<i>Poa compressa</i>	Flaches Rispengras

Anlage 2-2

Saatgutmischung B Straßenbegleitgrün Süd 2010-11 Rieger-Hofmann GmbH; Raboldshausen

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Achillea millefolium</i>	Gemeine Schafgarbe
<i>Anthyllis vulneraria</i>	Gemeiner Wundklee
<i>Campanula patula</i>	Wiesen-Glockenblume
<i>Campanula rotundifolia</i>	Rundblättrige Glockenblume
<i>Centaurea cyanus</i>	Korn-/Flockenblume
<i>Centaurea jacea</i>	Wiesen-Flockenblume
<i>Cichorium intybus</i>	Gewöhnliche Wegwarte
<i>Daucus carota</i>	Wilde Möhre
<i>Galium album</i>	Wiesenlabkraut
<i>Galium verum</i>	Echtes Labkraut
<i>Hypericum perforatum</i>	Echte Johanniskraut
<i>Hypochoeris radicata</i>	Gewöhnliches Ferkelkraut
<i>Knautia arvensis</i>	Acker-Witwenblume
<i>Leontodon hispidus</i>	Steifhaarige Löwenzahn
<i>Leucanthemum ircutianum</i>	Fettwiesen-Margerite
<i>Lotus corniculatus</i>	Gewöhnliche Hornklee
<i>Medicago lupulina</i>	Hopfenklee
<i>Papaver rhoeas</i>	Klatschmohn
<i>Pastinaca sativa</i>	Pastinak
<i>Plantago lanceolata</i>	Spitzwegerich
<i>Plantago media</i>	Mittlere Wegerich
<i>Prunella vulgaris</i>	Gewöhnliche Braunelle
<i>Rumex acetosa</i>	Wiesen-Sauerampfer
<i>Salvia pratensis</i>	Wiesensalbei
<i>Sanguisorba minor</i>	Kleine Wiesenknopf
<i>Silene nutans</i>	Nickendes Leimkraut
<i>Silene vulgaris</i>	Taubenkropf-Leimkraut
<i>Agrostis capillaris</i>	Rote Straußgras
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	Gewöhnliches Ruchgras
<i>Bromus erectus</i>	Aufrechte Trespe

Anlage 2-3

Saatgutmischung C Saatgutmischung für Mülldeponien Prof. Dr. B.-M. Wilke, TU Berlin

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Agrostis capillaris (tenuis)</i>	Rotes Straußgras
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	Gewöhnliches Ruchgras
<i>Avenochloa pubescens</i>	Flaumiger Wiesenhafer
<i>Festuca rubra</i>	Gewöhnlicher Rot-Schwingel
<i>Centaurea jacea</i>	Wiesen-Flockenblume
<i>Hypericum perforatum</i>	Echtes Johanniskraut
<i>Knautia arvensis</i>	Acker-Witwenblume
<i>Lathyrus aphaca</i>	Ranken-Platterbse
<i>Lupinus polyphyllus</i>	Vielblättrige Lupine
<i>Origanum vulgare</i>	Oregano
<i>Plantago lanceolata</i>	Spitzwegerich
<i>Prunella vulgaris</i>	Gewöhnliche Braunelle
<i>Trifolium campestre</i>	Feld-Klee
<i>Trifolium pratense</i>	Wiesen-Klee

Anlage 2-4

Saatgutmischung D Gras-Kräutermischung Thüringer Lehr- und Versuchsanstalt Gartenbau, Erfurt

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Agrostis capillaris</i>	Rotes Straußgras
<i>Arrhenatherum elatius</i>	Gewöhnliche Glatthafer
<i>Brachypodium pinnatum</i>	Fieder-Zwenke
<i>Bromus erectus</i>	Aufrechte Tresse
<i>Bromus secalinus</i>	Roggen-Tresse
<i>Dactylis glomerata</i>	Wiesen-Knäuelgras
<i>Festuca ovina</i>	Echter Schaf-Schwingel
<i>Festuca rubra</i>	Gewöhnliche Rot-Schwingel
<i>Festuca valesiaca</i>	Zwergblauschwingel
<i>Holcus lanatus</i>	Wollige Honiggras
<i>Lolium perenne</i>	Deutsche Weidelgras
<i>Poa annua</i>	Jährige Rispe
<i>Poa pratensis</i>	Wiesen-Rispengras
<i>Achillea millefolium</i>	Gemeine Schafgarbe
<i>Lotus corniculatus</i>	Gewöhnlicher Hornklee
<i>Medicago lupulina</i>	Hopfenklee

Anlage 2-5

Saatgutmischung E **Regelsaatgutmischung nach FLL (50% RSM 7.2.1 und 50% RSM 7.2.2)** **Thüringer Lehr- und Versuchsanstalt Gartenbau, Erfurt**

Botanischer Pflanzename	Deutscher Pflanzename
<i>Bromus erectus</i>	Aufrechte Tresse
<i>Festuca ovina</i>	Echter Schaf-Schwingel
<i>Festuca rubra rubra</i>	Gewöhnlicher Rot-Schwingel
<i>Lolium perenne</i>	Deutsche Weidelgras

Anlage 2-6

Saatgutmischung F **Regelsaatgutmischung nach FLL (50% RSM 7.1.1 und 50% RSM 7.1.2)** **Thüringer Lehr- und Versuchsanstalt Gartenbau, Erfurt**

Botanischer Pflanzename	Deutscher Pflanzename
<i>Agrostis capillaris</i>	Rotes Straußgras
<i>Festuca ovina</i>	Echter Schaf-Schwingel
<i>Festuca rubra rubra</i>	Gewöhnlicher Rot-Schwingel
<i>Poa pratensis</i>	Wiesen-Rispengras

Anlage 2-7

Saatgutmischung G **Landschaftsrassen GF 711, Standard ohne Kräuter, RSM 7.1.1** **Feldsaaten Freudenberger, Krefeld**

Botanischer Pflanzename	Deutscher Pflanzename
<i>Agrostis capillaris</i> HIGHLAND	Rotes Straußgras
<i>Festuca ovina duriuscula</i> SPARTAN	Schaf-Schwingel
<i>Festuca rubra commutata</i> CASANOVA	Gewöhnliche Rot-Schwingel
<i>Poa pratensis</i>	Wiesen-Rispengras (PANDURO)
<i>Lolium perenne</i>	Deutsche Weidelgras (FANCY)

Anlage 2-8

Saatgutmischung H **Landschaftsrassen GF 712, Standard mit Kräuter, RSM 7.1.2** **Feldsaaten Freudenberger, Krefeld**

Botanischer Pflanzename	Deutscher Pflanzename
<i>Agrostis capillaris</i> HIGHLAND	Rotes Straußgras
<i>Festuca ovina duriuscula</i> SPARTAN	Schaf-Schwingel
<i>Festuca rubra commutata</i> CASANOVA	Gewöhnliche Rot-Schwingel
<i>Poa pratensis</i>	Wiesen-Rispengras (PANDURO)
<i>Lolium perenne</i>	Deutsche Weidelgras (ULTRA)
<i>Achillea millefolium</i>	Gemeine Schafgarbe
<i>Centaurea jacea</i>	Wiesen-Flockenblume
<i>Daucus carota</i>	Wilde Möhre
<i>Galium verum</i>	Echtes Labkraut
<i>Leontodon</i> ssp.	Steifhaarige Löwenzahn
<i>Leucanthemum vulgare</i>	Magerwiesen-Margerite
<i>Pimpinella saxifraga</i>	Kleine Bibernelle
<i>Plantago lanceolata</i>	Spitzwegerich
<i>Sanguisorba minor</i>	Kleiner Wiesenknopf
<i>Lotus corniculatus</i>	Gewöhnliche Hornklee
<i>Medicago lupulina</i>	Hopfenklee

Anlage 2-9

Saatgutmischung I **Landschaftsrassen GF 721, Trockenlagen ohne Kräuter, RSM 7.2.1** **Feldsaaten Freudenberger, Krefeld**

Botanischer Pflanzename	Deutscher Pflanzename
<i>Festuca ovina duriuscula</i>	Schaf-Schwingel
<i>Festuca rubra</i>	Gewöhnliche Rot-Schwingel
<i>Lolium perenne</i>	Deutsche Weidelgras

Anlage 2-10

Saatgutmischung J **Landschaftsrassen GF 722, Trockenlagen mit Kräuter, RSM 7.2.2** **Feldsaaten Freudenberger, Krefeld**

Botanischer Pflanzename	Deutscher Pflanzename
<i>Festuca ovina duriuscula</i>	Schaf-Schwingel
<i>Festuca rubra</i>	Gewöhnliche Rot-Schwingel
<i>Lolium perenne</i>	Deutsche Weidelgras
<i>Achillea millefolium</i>	Gemeine Schafgarbe
<i>Centaurea jacea</i>	Wiesen-Flockenblume
<i>Centaurea scabiosa</i>	Skabiosen-Flockenblume
<i>Daucus carota</i>	Wilde Möhre
<i>Galium mollugo</i>	Wiesen-Labkraut
<i>Galium verum</i>	Echtes Labkraut
<i>Leontodon ssp.</i>	Steifhaarige Löwenzahn
<i>Leucanthemum vulgare</i>	Magerwiesen-Margerite
<i>Pimpinella saxifraga</i>	Kleine Bibernelle
<i>Plantago lanceolata</i>	Spitzwegerich
<i>Salvia pratensis</i>	Wiesensalbei
<i>Sanguisorba minor</i>	Kleiner Wiesenknopf
<i>Anthyllis vulneraria</i>	Gemeiner Wundklee
<i>Lotus corniculatus</i>	Gewöhnlicher Hornklee
<i>Medicago lupulina</i>	Hopfenklee
<i>Onobrychis viciifolia</i>	Saat-Esparsette

Anlage 2-11

Saatgutmischung K Landschaftsrasen GF 740, Halbschatten, RSM 7.4 Feldsaaten Freudenberger, Krefeld

Botanischer Pflanzename	Deutscher Pflanzename
<i>Agrostis capillaris</i> HIGHLAND	Rotes Straußgras
<i>Festuca ovina duriuscula</i>	Schaf-Schwingel
<i>Festuca rubra</i>	Gewöhnliche Rot-Schwingel
<i>Poa pratensis</i>	Wiesen-Rispengras (PANDURO)
<i>Poa nemoralis</i>	Hain-Rispengras (ENHARY)
<i>Lolium perenne</i>	Deutsche Weidelgras

Anlage 2-12

Saatgutmischung L Extensivrasen GF 840, Spezialmischung Feldsaaten Freudenberger, Krefeld

Botanischer Pflanzename	Deutscher Pflanzename
<i>Achillea millefolium</i>	Gemeine Schafgarbe
<i>Festuca ovina dur.</i>	Schaf-Schwingel
<i>Festuca rubra rubra</i>	Gewöhnliche Rot-Schwingel
<i>Lolium perenne</i>	Deutsche Weidelgras
<i>Lotus corniculatus</i>	Gewöhnliche Hornklee
<i>Medicago lupulina</i>	Hopfenklee
<i>Onobrychis viciifolia</i>	Saat-Esparsette
<i>Poa pratensis</i>	Wiesen-Rispengras
<i>Sanguisorba minor</i>	Kleiner Wiesenknopf
<i>Trifolium incarnatum</i>	Inkarnat-Klee

Anlage 2-13

Saatgutmischung M Mulden und Rigolen GF 890, Spezialmischung Feldsaaten Freudenberger, Krefeld

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Festuca ovina duriuscula</i>	Schaf-Schwingel
<i>Festuca rubra rubra</i>	Gewöhnliche Rot-Schwingel
<i>Lolium perenne</i>	Deutsche Weidelgras
<i>Poa pratensis</i>	Wiesen-Rispengras
<i>Poa trivialis</i>	Gewöhnliches Rispengras
<i>Poa nemoralis</i>	Hain-Rispengras

Anlage 2-14

Saatgutmischung N Böschungsrassen mit Klee GL 815, Spezialmischung Feldsaaten Freudenberger, Krefeld

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Cynosurus cristatus</i>	Wiesen-Kammgras
<i>Festuca rubra rubra</i>	Gewöhnliche Rot-Schwingel
<i>Lolium perenne</i>	Deutsche Weidelgras
<i>Poa pratensis</i>	Wiesen-Rispengras
<i>Trifolium alexandrinum</i>	Ägyptische Klee
<i>Trifolium repens</i>	Weiß-Klee

Anlage 2-15

Saatgutmischung O Böschungsrassen ohne Klee GL 817, Spezialmischung Feldsaaten Freudenberger, Krefeld

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Cynosurus cristatus</i>	Wiesen-Kammgras
<i>Festuca rubra rubra</i>	Gewöhnliche Rot-Schwingel
<i>Lolium perenne</i>	Deutsche Weidelgras
<i>Poa pratensis</i>	Wiesen-Rispengras

Anlage 2-16

Saatgutmischung P **Sächsische Qualitätssaatmischungen für Grünland - QG2 Wiese** **frische bis feuchte und wechselfeuchte Standorte** **Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft**

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Lolium perenne</i>	Deutsches Weidelgras
<i>Festuca pratensis</i>	Wiesenschwingel
<i>Phleum pratense</i>	Wiesenlieschgras
<i>Poa pratensis</i>	Wiesenrispe
<i>Trifolium pratense</i>	Rotklee
<i>Trifolium repens</i>	Weißklee

Anlage 2-17

Saatgutmischung Q **frischer, mäßig saurer, stickstoffarmer Standort** **Prof. Dr. B.-M. Wilke, TU Berlin**

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Achillea millefolium</i>	Gemeine Schafgarbe
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	Gewöhnliches Ruchgras
<i>Arrhenatherum elatius</i>	Gewöhnlicher Glatthafer
<i>Carum carvi</i>	Gemeiner Kümmel
<i>Centaurea jacea</i>	Wiesen-Flockenblume
<i>Cynosurus cristatus</i>	Wiesen-Kammgras
<i>Dactylis glomerata</i>	Wiesen- Knäuelgras
<i>Daucus carota</i>	Wilde Möhre
<i>Festuca pratensis</i>	Wiesen-Schwingel
<i>Festuca rubra</i>	Gewöhnliche Rot-Schwingel
<i>Galium mollugo</i>	Wiesen-Labkraut
<i>Holcus lanatus</i>	Wollige Honiggras
<i>Phleum pratense</i>	Wiesen-Lieschgras
<i>Plantago lanceolata</i>	Spitzwegerich
<i>Poa pratensis</i>	Wiesen-Rispengras
<i>Senecio jacobaea</i>	Jakobs-Greiskraut
<i>Tragopogon pratensis</i>	Wiesen-Bocksbart
<i>Trifolium dubium</i>	Faden-Klee
<i>Trifolium pratense</i>	Wiesen-Klee
<i>Trisetum flavescens</i>	Wiesen-Goldhafer

Anlage 2-18

Saatgutmischung R Magerrasen Nr. 3, 2010-11; Herkunft 7 Rieger-Hofmann GmbH; Raboldshausen

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Achillea millefolium</i>	Gemeine Schafgarbe
<i>Anthyllis vulneraria</i>	Gemeiner Wundklee
<i>Aster amellus</i>	Berg-Aster
<i>Campanula glomerata</i>	Knäuelglockenblume
<i>Campanula rotundifolia</i>	Rundblättrige Glockenblume
<i>Centaurea scabiosa</i>	Skabiosen-Flockenblume
<i>Daucus carota</i>	Wilde Möhre
<i>Euphorbia cyparissias</i>	Zypressen-Wolfsmilch
<i>Galium verum</i>	Echtes Labkraut
<i>Hieracium pilosella</i>	Kleine Habichtskraut
<i>Leontodon hispidus</i>	Steifhaarige Löwenzahn
<i>Leucanthemum ircutianum</i>	Fettwiesen-Margerite
<i>Pimpinella saxifraga</i>	Kleine Bibernelle
<i>Plantago media</i>	Mittlerer Wegerich
<i>Primula veris</i>	Echte Schlüsselblume
<i>Prunella grandiflora</i>	Große Braunelle
<i>Ranunculus bulbosus</i>	Knolliger Hahnenfuß
<i>Rhinanthus minor</i>	Kleiner Klappertopf
<i>Salvia pratensis</i>	Wiesensalbei
<i>Sanguisorba minor</i>	Kleiner Wiesenknopf
<i>Scabiosa columbaria</i>	Tauben-Skabiose
<i>Sedum acre</i>	Scharfe Mauerpfeffer
<i>Silene nutans</i>	Nickendes Leimkraut
<i>Thymus pulegioides</i>	Breitblättriger Thymian
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	Gewöhnliches Ruchgras
<i>Bromus erectus</i>	Aufrechte Trespe
<i>Carex flacca</i>	Blaugrüne Segge
<i>Helictotrichon pratensis</i>	Echter Wiesenhafer
<i>Phleum phleoides</i>	Steppen-Lieschgras
<i>Achillea millefolium</i>	Gemeine Schafgarbe

Anlage 2-19

Saatgutmischung S Magerrasen Nr. 3, 2010-11; Herkunft 8 Rieger-Hofmann GmbH; Raboldshausen

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Achillea millefolium</i>	Gemeine Schafgarbe
<i>Anthyllis vulneraria</i>	Gemeiner Wundklee
<i>Aster amellus</i>	Berg-Aster
<i>Betonica officinalis</i>	Betonie
<i>Bupthalmum salicifolium</i>	Weidenblättriges Ochsenauge
<i>Campanula glomerata</i>	Knäuelglockenblume
<i>Campanula rotundifolia</i>	Rundblättrige Glockenblume
<i>Centaurea jacea</i>	Wiesen-Flockenblume
<i>Centaurea scabiosa</i>	Skabiosen-Flockenblume
<i>Centaurea stoebe</i>	Rispen-Flockenblume
<i>Daucus carota</i>	Wilde Möhre
<i>Euphorbia cyparissias</i>	Zypressen-Wolfsmilch
<i>Filipendula vulgaris</i>	Kleines Mädesüß
<i>Galium verum</i>	Echtes Labkraut
<i>Hieracium pilosella</i>	Kleines Habichtskraut
<i>Knautia arvensis</i>	Acker-Witwenblume
<i>Leontodon hispidus</i>	Steifhaarige Löwenzahn
<i>Leucanthemum ircutianum</i>	Fettwiesen-Margerite
<i>Pimpinella saxifraga</i>	Kleine Bibernelle
<i>Plantago media</i>	Mittlerer Wegerich
<i>Primula veris</i>	Echte Schlüsselblume
<i>Prunella grandiflora</i>	Große Braunelle
<i>Ranunculus bulbosus</i>	Knolliger Hahnenfuß
<i>Rhinanthus minor</i>	Kleiner Klappertopf
<i>Salvia pratensis</i>	Wiesensalbei
<i>Sanguisorba minor</i>	Kleiner Wiesenknopf
<i>Scabiosa columbaria</i>	Tauben-Skabiose
<i>Sedum acre</i>	Scharfe Mauerpfeffer
<i>Silene nutans</i>	Nickendes Leimkraut
<i>Teucrium chamaedrys</i>	Edel-Gamander
<i>Thymus pulegioides</i>	Breitblättriger Thymian
<i>Trifolium campestre</i>	Feld-Klee
<i>Agrostis capillaris</i>	Rotes Straußgras
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	Gewöhnliches Ruchgras

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Bromus erectus</i>	Aufrechte Tresse
<i>Carex flacca</i>	Blaugrüne Segge
<i>Helictotrichon pratensis</i>	Echter Wiesenhafer
<i>Phleum phleoides</i>	Steppen-Lieschgras
<i>Trisetum flavescens</i>	Wiesen-Goldhafer

Anlage 2-20

Saatgutmischung T Sächsische Qualitätssaatmischungen für Grünland – QG7 Wiese frische bis trockene Standorte Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Lolium perenne</i>	Deutsches Weidelgras
<i>Festuca pratensis</i>	Wiesenschwingel
<i>Phleum pratense</i>	Wiesenlieschgras
<i>Poa pratensis</i>	Wiesenrispe
<i>Dactylis glomerata</i>	Wiesen-Knäuelgras
<i>Festuca rubra</i>	Rotschwingel
<i>Trifolium pratense</i>	Rotklee
<i>Trifolium repens</i>	Weißklee

Anlage 2-21

Saatgutmischung U **Sächsische Qualitätssaatmischungen für Grünland – QG3 Wiese** **Höhenlagen** **Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft**

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Festuca pratensis</i>	Wiesenschwingel
<i>Phleum pratense</i>	Wiesenlieschgras
<i>Poa pratensis</i>	Wiesenrispe
<i>Dactylis glomerata</i>	Wiesen-Knäuelgras
<i>Festuca rubra</i>	Rotschwingel
<i>Arrhenatherum elatius</i>	Glatthafer
<i>Trisetum flavescens</i>	Goldhafer
<i>Trifolium pratense</i>	Rotklee
<i>Trifolium repens</i>	Weißklee

Anlage 2-22

Saatgutmischung V **frischer, mäßig basischer, stickstoffreicher Standort** **Prof. Dr. B.-M. Wilke, TU Berlin**

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Achillea millefolium</i>	Gemeine Schafgarbe
<i>Carum carvi</i>	Gemeiner Kümmel
<i>Centaurea jacea</i>	Wiesen-Flockenblume
<i>Cichorium intybus</i>	Gewöhnliche Wegwarte
<i>Daucus carota</i>	Wilde Möhre
<i>Medicago lupulina</i>	Hopfenklee
<i>Pastinaca sativa</i>	Pastinak
<i>Plantago lanceolata</i>	Spitzwegerich
<i>Salvia pratensis</i>	Wiesen-Salbei
<i>Trifolium pratense</i>	Wiesen-Klee
<i>Trisetum flavescens</i>	Wiesen-Goldhafer

Anlage 2-23

Saatgutmischung W Freudenberger GL, Begrünungsmischung Feldsaaten Freudenberger, Krefeld

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Festuca arundinacea</i>	Rohr-Schwingel
<i>Cynosurus cristatus</i>	Wiesen-Kammgras
<i>Festuca rubra rubra</i>	Gewöhnliche Rot-Schwingel
<i>Lolium perenne</i>	Deutsche Weidelgras

Anlage 2-24

Saatgutmischung X Magerrasen Nr. 3, 2010-11; Herkunft 3 Rieger-Hofmann GmbH; Raboldshausen

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Achillea millefolium</i>	Gemeine Schafgarbe
<i>Anthyllis vulneraria</i>	Gemeiner Wundklee
<i>Campanula rotundifolia</i>	Rundblättrige Glockenblume
<i>Centaurea scabiosa</i>	Skabiosen-Flockenblume
<i>Daucus carota</i>	Wilde Möhre
<i>Dianthus deltoides</i>	Heide-Nelke
<i>Euphorbia cyparissias</i>	Zypressen-Wolfsmilch
<i>Filipendula vulgaris</i>	Kleines Mädesüß
<i>Galium verum</i>	Echtes Labkraut
<i>Hieracium pilosella</i>	Kleines Habichtskraut
<i>Leontodon hispidus</i>	Steifhaarige Löwenzahn
<i>Leucanthemum ircutianum</i>	Fettwiesen-Margerite
<i>Pimpinella saxifraga</i>	Kleine Bibernelle
<i>Plantago media</i>	Mittlere Wegerich
<i>Primula veris</i>	Echte Schlüsselblume
<i>Ranunculus bulbosus</i>	Knollige Hahnenfuß
<i>Rhinanthus minor</i>	Kleine Klappertopf
<i>Salvia pratensis</i>	Wiesensalbei
<i>Sanguisorba minor</i>	Kleine Wiesenknopf
<i>Sedum acre</i>	Scharfe Mauerpfeffer
<i>Thymus pulegioides</i>	Breitblättrige Thymian
<i>Trifolium campestre</i>	Feld-Klee
<i>Agrostis capillaris</i>	Rote Straußgras

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	Gewöhnliches Ruchgras
<i>Bromus erectus</i>	Aufrechte Trespe

Anlage 2-25

Saatgutmischung Y
Sächsische Qualitätssaatmischungen für Grünland – QG1 Wiese
mäßig trockener Standort
Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Festuca pratensis</i>	Wiesenschwingel
<i>Phleum pratense</i>	Wiesenlieschgras
<i>Poa pratensis</i>	Wiesenrispe
<i>Dactylis glomerata</i>	Wiesen-Knäuelgras
<i>Festuca rubra</i>	Rotschwingel
<i>Arrhenatherum elatius</i>	Glatthafer
<i>Trifolium pratense</i>	Rotklee
<i>Trifolium repens</i>	Weißklee

Anlage 2-26

Saatgutmischung Z
Magerrasen Nr. 3, 2010-11; Herkunft 4
Rieger-Hofmann GmbH; Raboldshausen

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Achillea millefolium</i>	Gemeine Schafgarbe
<i>Campanula rotundifolia</i>	Rundblättrige Glockenblume
<i>Centaurea jacea</i>	Wiesen-Flockenblume
<i>Centaurea scabiosa</i>	Skabiosen-Flockenblume
<i>Daucus carota</i>	Wilde Möhre
<i>Dianthus deltoides</i>	Heide-Nelke
<i>Euphorbia cyparissias</i>	Zypressen-Wolfsmilch
<i>Hieracium pilosella</i>	Kleine Habichtskraut
<i>Hypochoeris radicata</i>	Gewöhnliches Ferkelkraut
<i>Knautia arvensis</i>	Acker-Witwenblume
<i>Leontodon hispidus</i>	Steifhaarige Löwenzahn
<i>Leucanthemum ircutianum</i>	Fettwiesen-Margerite
<i>Pimpinella saxifraga</i>	Kleine Bibernelle

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Plantago media</i>	Mittlerer Wegerich
<i>Primula veris</i>	Echte Schlüsselblume
<i>Prunella vulgaris</i>	Gewöhnliche Braunelle
<i>Ranunculus bulbosus</i>	Knolliger Hahnenfuß
<i>Rhinanthus minor</i>	Kleiner Klappertopf
<i>Salvia pratensis</i>	Wiesensalbei
<i>Sanguisorba minor</i>	Kleiner Wiesenknopf
<i>Scabiosa columbaria</i>	Tauben-Skabiose
<i>Sedum acre</i>	Scharfe Mauerpfeffer
<i>Thymus pulegioides</i>	Breitblättriger Thymian
<i>Agrostis capillaris</i>	Rote Straußgras
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	Gewöhnliches Ruchgras

Anlage 2-27

Saatgutmischung AA Deponiebegrünungsmischung, Kräuter ohne aggressive Tiefwurzler Saaten Zeller e. K.; Eichenbühl

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Achillea millefolium</i>	Gemeine Schafgarbe
<i>Centaurea jacea</i>	Wiesenflockenblume
<i>Centaurea scabiosa</i>	Skabiosenflockenblume
<i>Galium album</i>	Wiesenlabkraut
<i>Galium verum</i>	Echtes Labkraut
<i>Hypericum perforatum</i>	Echte Johanniskraut
<i>Hypochoeris radicata</i>	Gewöhnliches Ferkelkraut
<i>Knautia arvensis</i>	Acker-Witwenblume
<i>Leucanthemum ircutianum</i>	Fettwiesen-Margerite
<i>Papaver rhoeas</i>	Klatschmohn
<i>Plantago lanceolata</i>	Spitzwegerich
<i>Prunella vulgaris</i>	Gewöhnliche Braunelle
<i>Ranunculus acris</i>	Scharfer Hahnenfuß
<i>Rumex acetosa</i>	Wiesen-Sauerampfer
<i>Salvia pratensis</i>	Wiesensalbei
<i>Sanguisorba minor</i>	Kleiner Wiesenknopf
<i>Stellaria graminea</i>	Grassternmiere
<i>Thymus pulegioides</i>	Breitblättriger Thymian

Anlage 2-28

Saatgutmischung AB Saatgutmischung für Bodenaufschlüsse und Bodenverbesserung schwach saurer bis basischer Standort Prof. Dr. B.-M. Wilke, TU Berlin

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Anthyllis vulneraria</i>	Gemeiner Wundklee
<i>Bromus erectus</i>	Aufrechte Trespe
<i>Centaurea scabiosa</i>	Skabiosen-Flockenblume
<i>Cichorium intybus</i>	Gewöhnliche Wegwarte
<i>Medicago sativa</i>	Saat-Luzerne
<i>Onobrychis viciifolia</i>	Saat-Esparsett
<i>Salvia pratensis</i>	Wiesen-Salbei

Anlage 2-29

Saatgutmischung AC trockener, basischer, stickstoffarmer Standort Prof. Dr. B.-M. Wilke, TU Berlin

Botanischer Pflanzenname	Deutscher Pflanzenname
<i>Anthyllis vulneraria</i>	Gemeiner Wundklee
<i>Bromus erectus</i>	Aufrechte Trespe
<i>Centaurea scabiosa</i>	Skabiosen-Flockenblume
<i>Festuca ovina</i>	Echter Schaf-Schwingel
<i>Medicago sativa</i>	Saat-Luzerne
<i>Onobrychis viciifolia</i>	Saat-Esparsette
<i>Poa compressa</i>	Flaches Rispengras
<i>Salvia verticillata</i>	Quirlblütiger Salbei
<i>Sanguisorba minor</i>	Kleiner Wiesenknopf

Anlage 3:

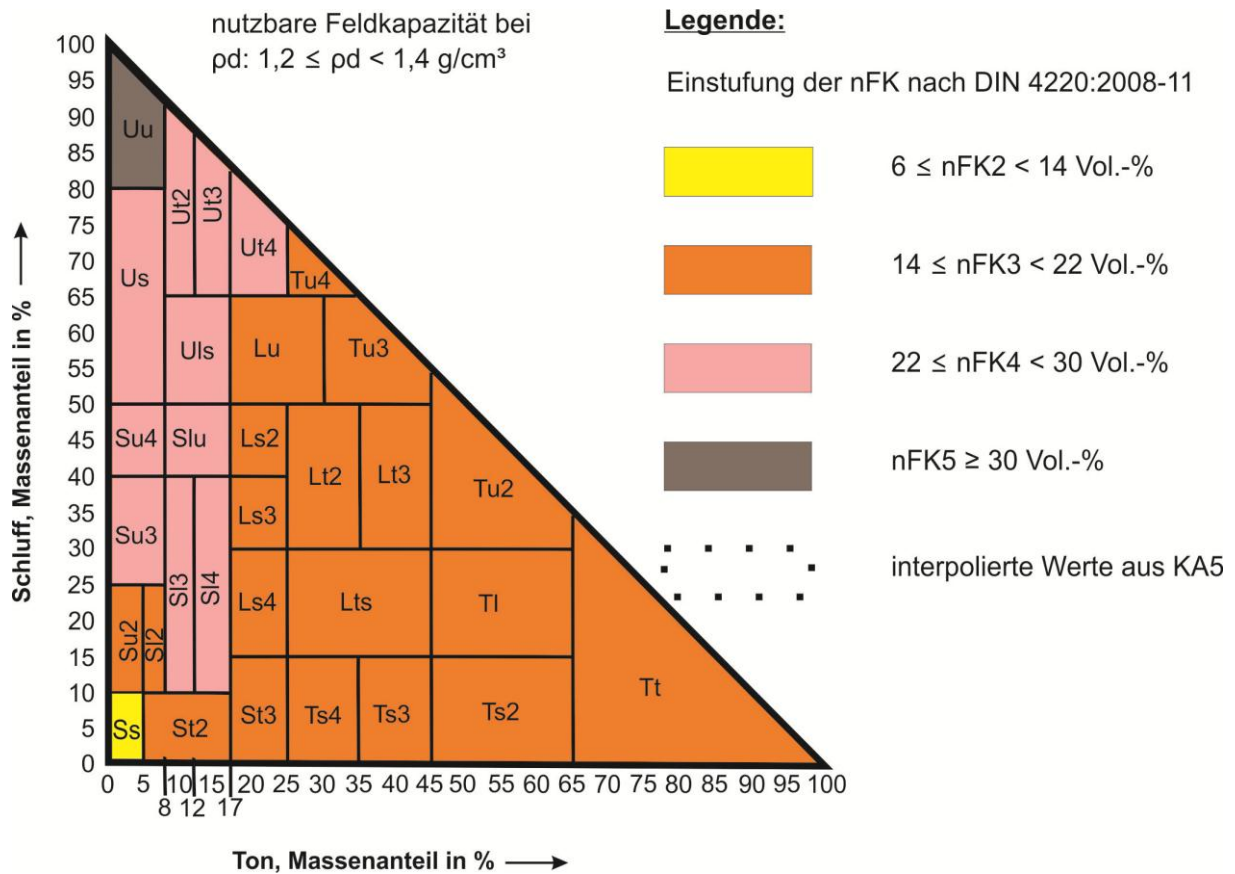
Ebenen des Feinbodenartendiagramms nach KA 5

Anlage 3.1:

Ebenen „Nutzbare Feldkapazität“

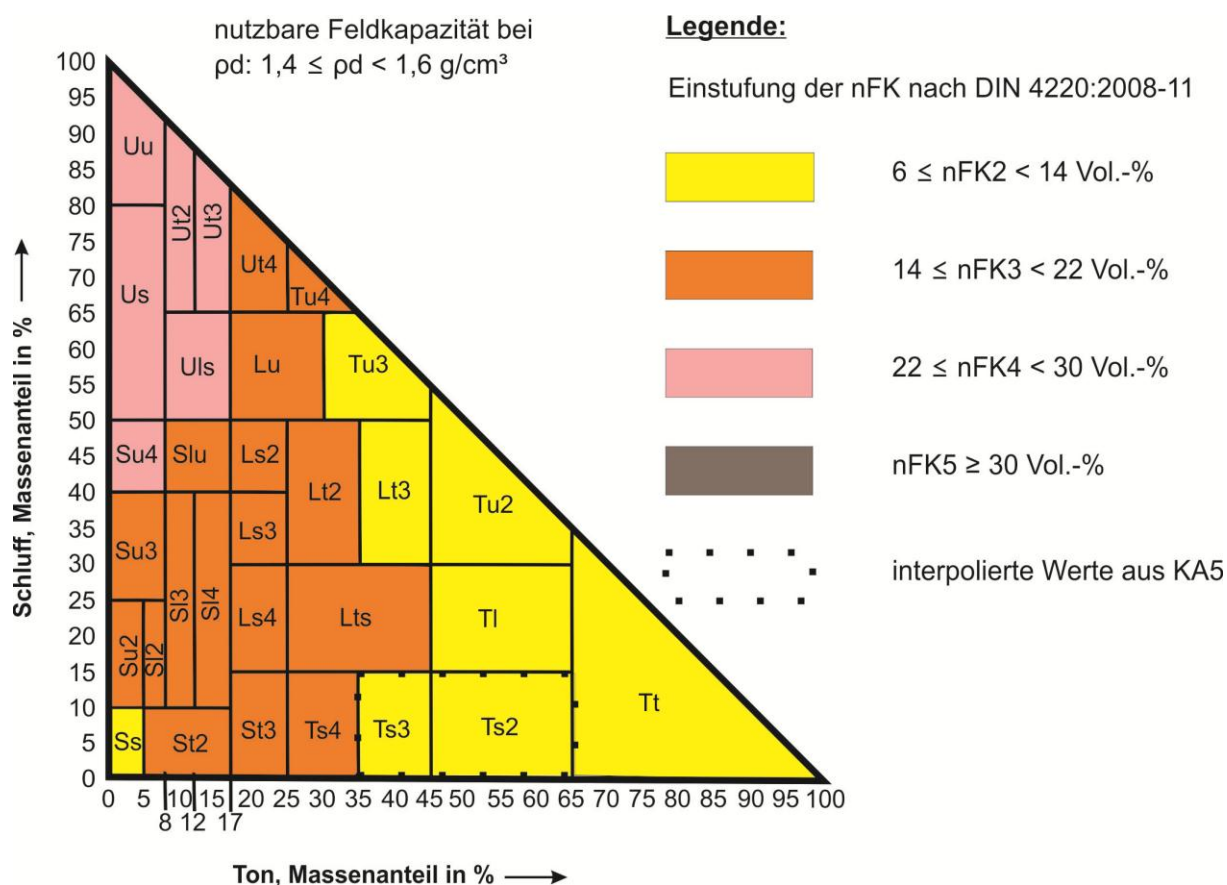
Anlage 3.1-1

Ebene „Nutzbare Feldkapazität“ im Bereich der Trockendichte $1,2 \leq p_d < 1,4 \text{ g/cm}^3$



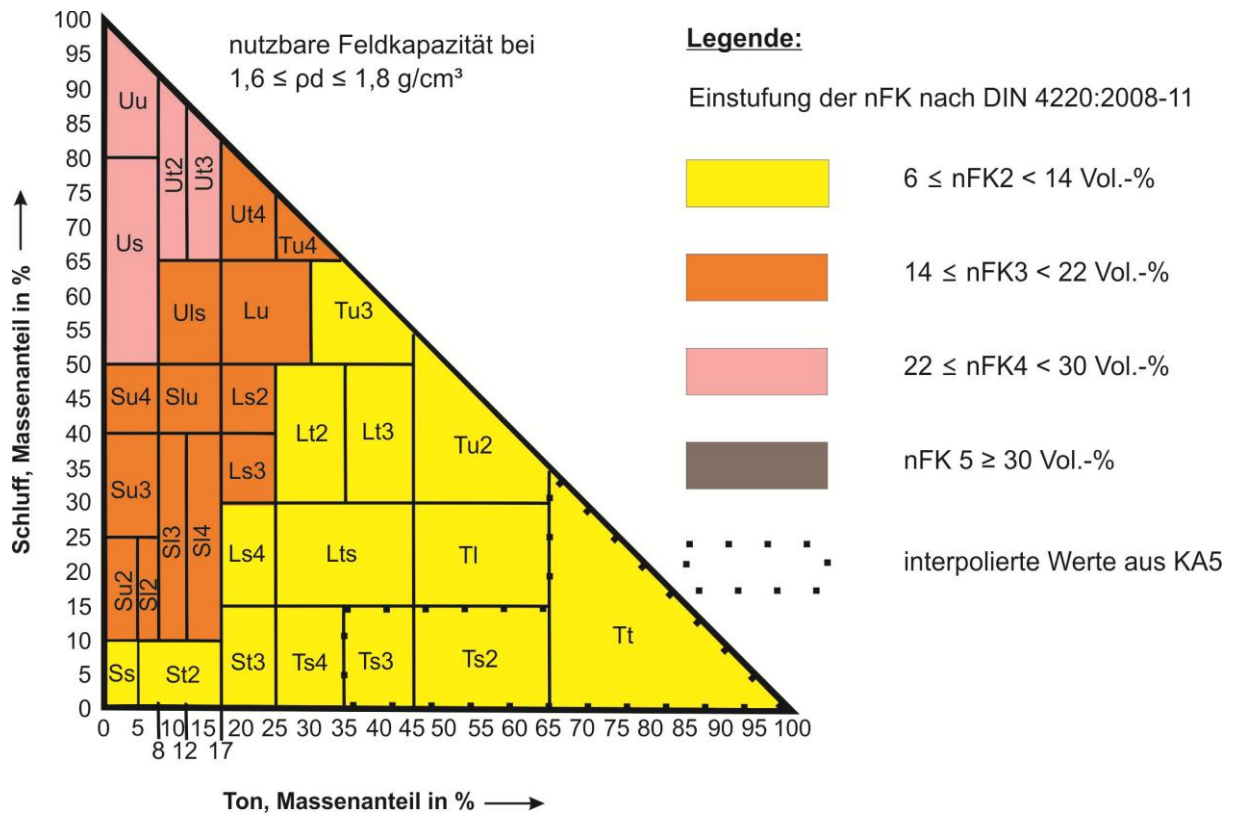
Anlage 3.1-2

Ebene „Nutzbare Feldkapazität“ im Bereich der Trockendichte $1,4 \leq \rho_d < 1,6 \text{ g/cm}^3$



Anlage 3.1-3

Ebene „Nutzbare Feldkapazität“ im Bereich der Trockendichte $1,6 \leq \rho_d \leq 1,8 \text{ g/cm}^3$

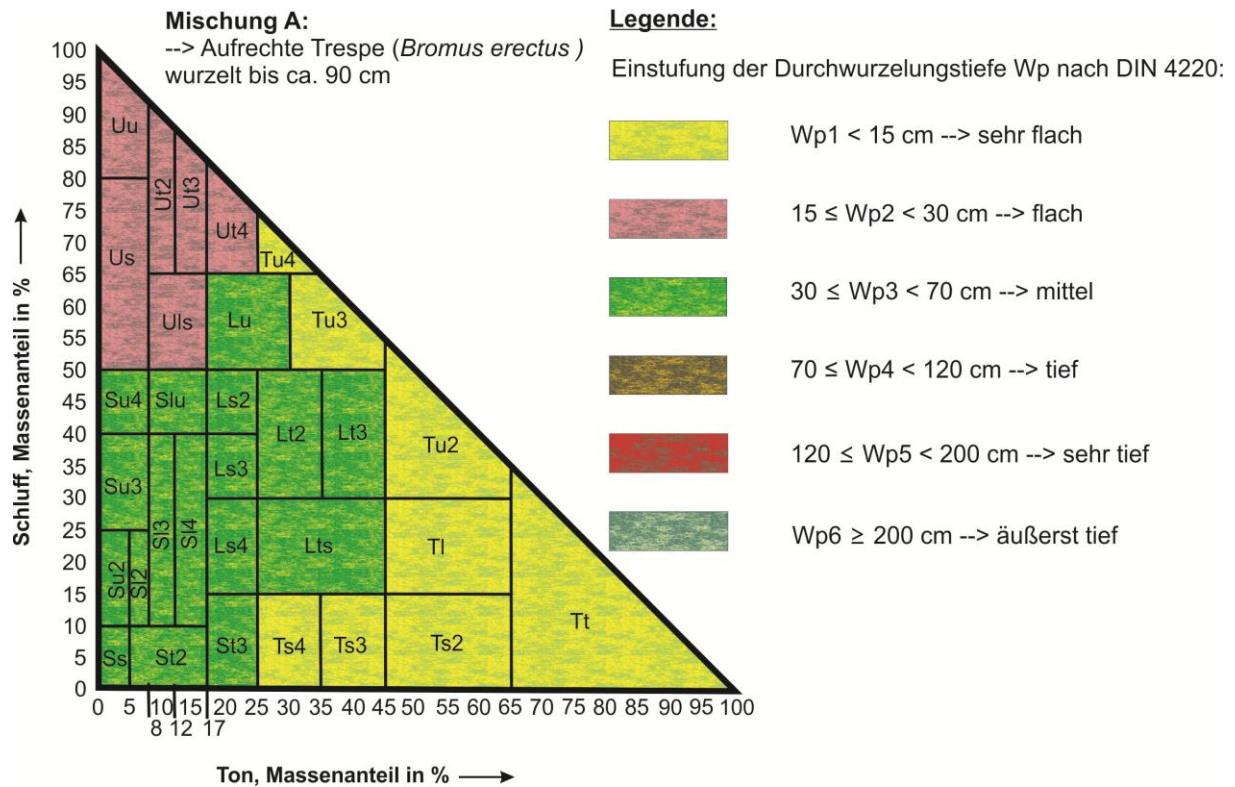


Anlage 3.2:
Ebenen „Durchwurzelung“

“

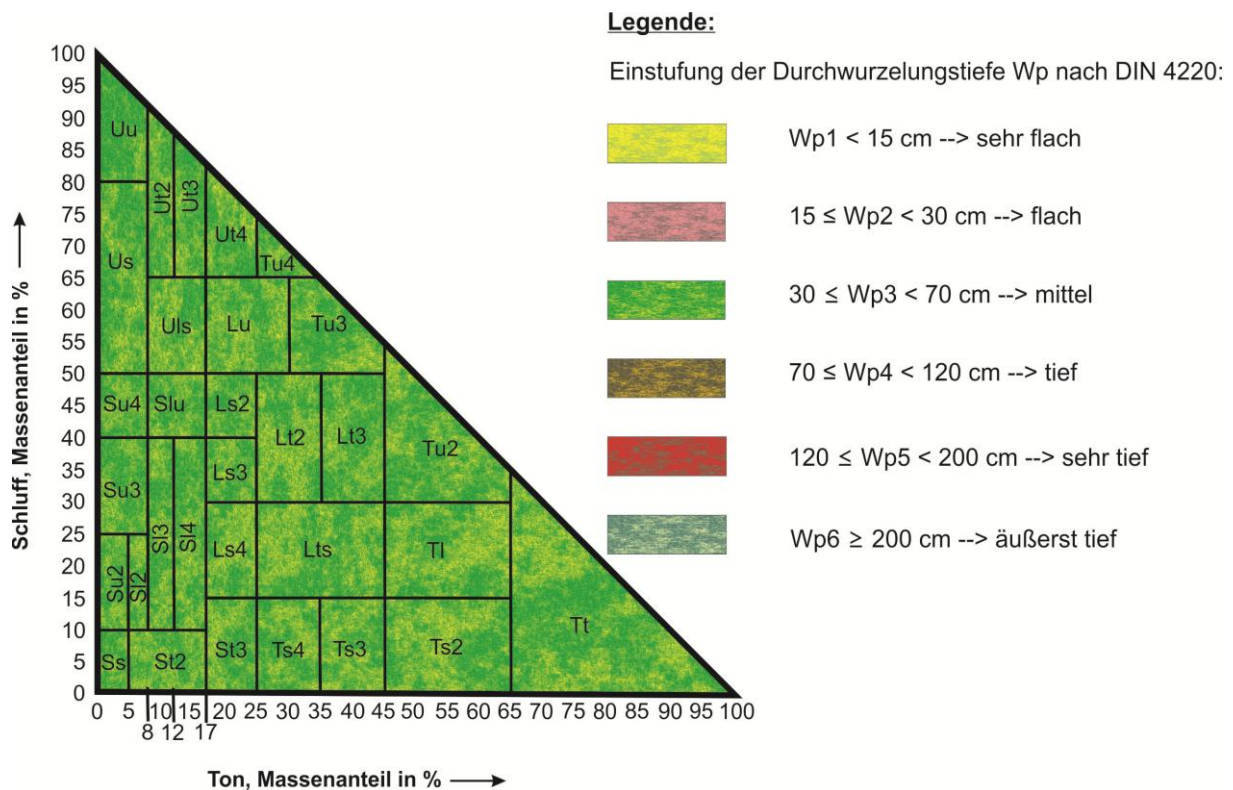
Anlage 3.2-1

Ebene „Durchwurzelung“ für die Mischung A



Anlage 3.2-2

Ebene „Durchwurzelung“ für die Mischungen B – M



Mischung C:

- > Wiesen-Flockenblume (*Centaurea jacea*) wurzelt bis ca. 250 cm
- > Acker-Witwenblume (*Knautia arvensis*) wurzelt bis ca. 120 cm
- > Wiesen-Klee (*Trifolium pratense*) wurzelt bis ca. 100 cm

Mischung D:

- > Deutsches Weidelgras (*Lolium perenne*) wurzelt bis ca. 100 cm
- > Aufrechte Trespe (*Bromus erectus*) wurzelt bis ca. 90 cm
- > Gewöhnliche Glatthafer (*Arrhenatherum elatius*) wurzelt bis ca. 150 cm

Mischung E:

- > Deutsches Weidelgras (*Lolium perenne*) wurzelt bis ca. 100 cm
- > Aufrechte Trespe (*Bromus erectus*) wurzelt bis ca. 90 cm

Mischung G; H; I; J; K und M:

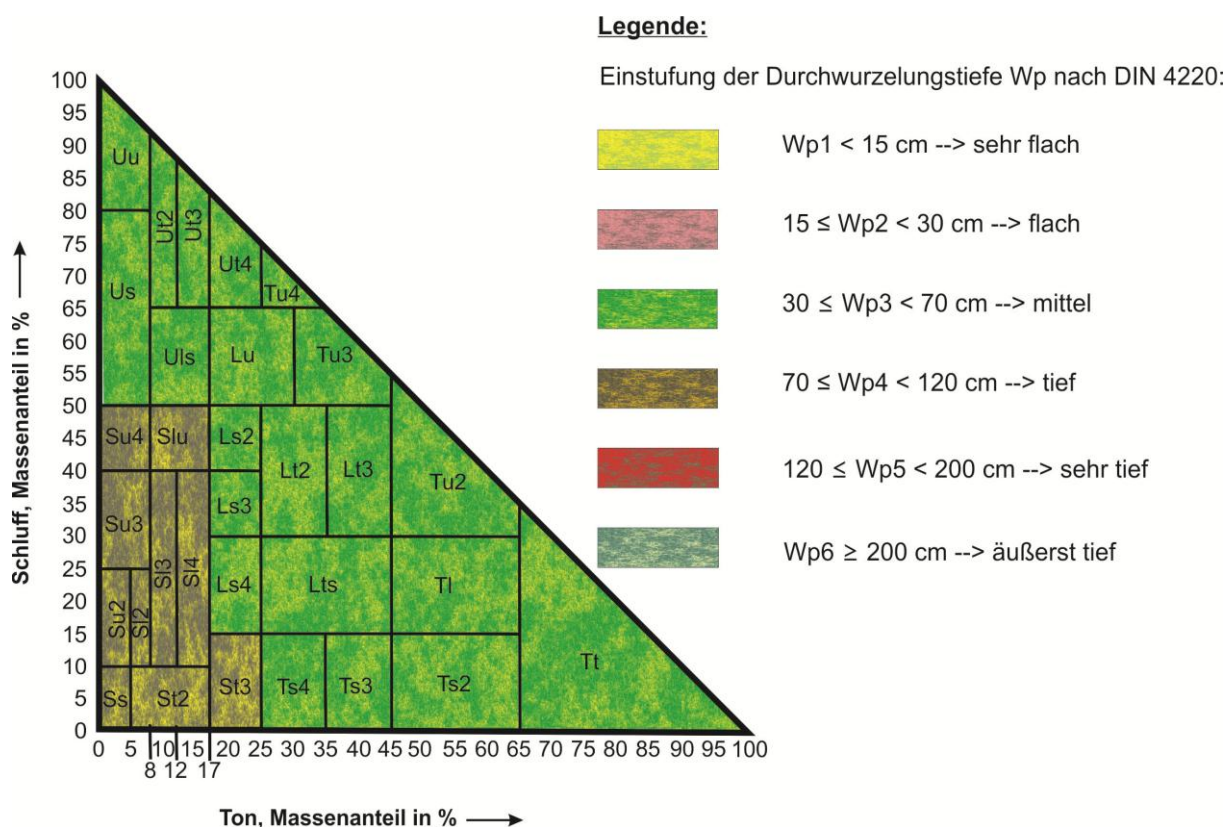
- > Deutsches Weidelgras (*Lolium perenne*) wurzelt bis ca. 100 cm

Mischung L:

- > Saat-Esparsette (*Onobrychis viciifolia*) wurzelt bis ca. 350 cm
- > Deutsches Weidelgras (*Lolium perenne*) wurzelt bis ca. 100 cm

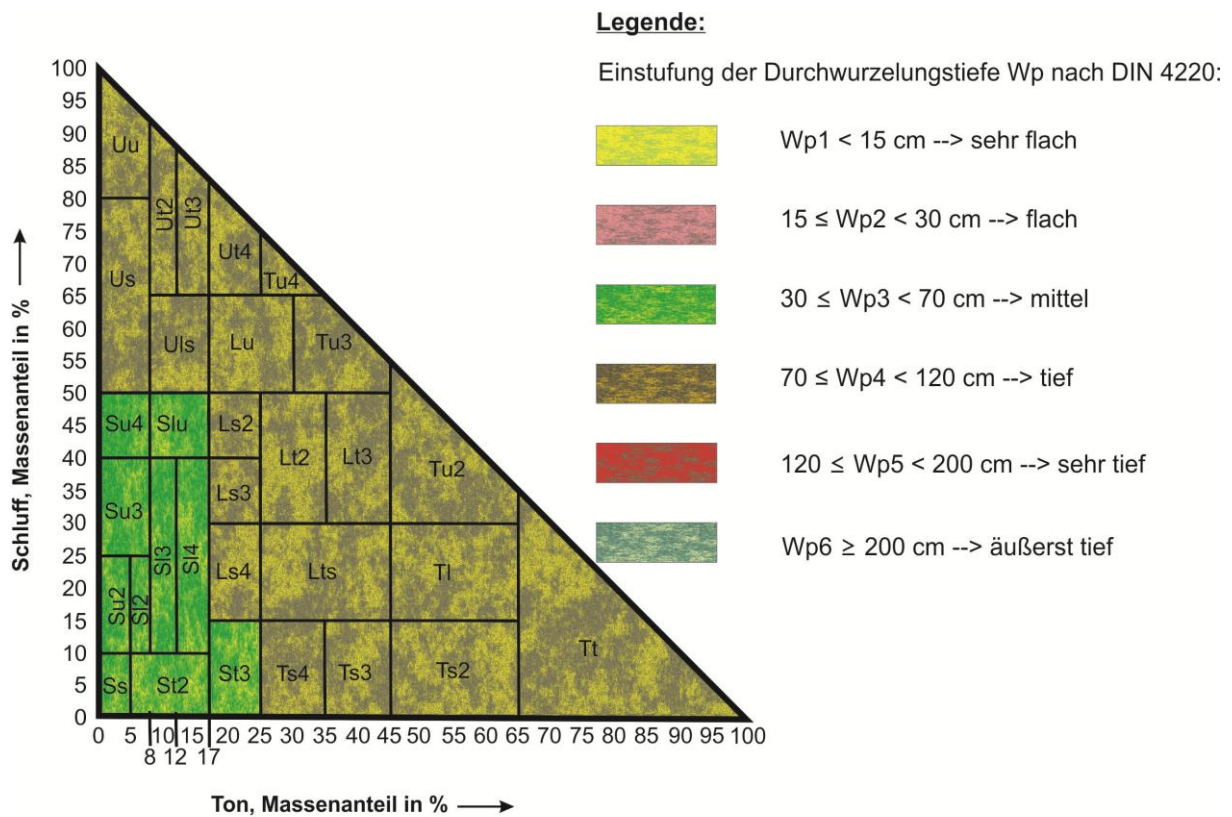
Anlage 3.2-3

Ebene „Durchwurzelung“ für die Mischungen N – O



Anlage 3.2-4

Ebene „Durchwurzelung“ für die Mischungen P – S



Mischung P:

--> Wiesen-Schwingel (*Festuca pratensis*) wurzelt bis ca. 140 cm

Mischung Q:

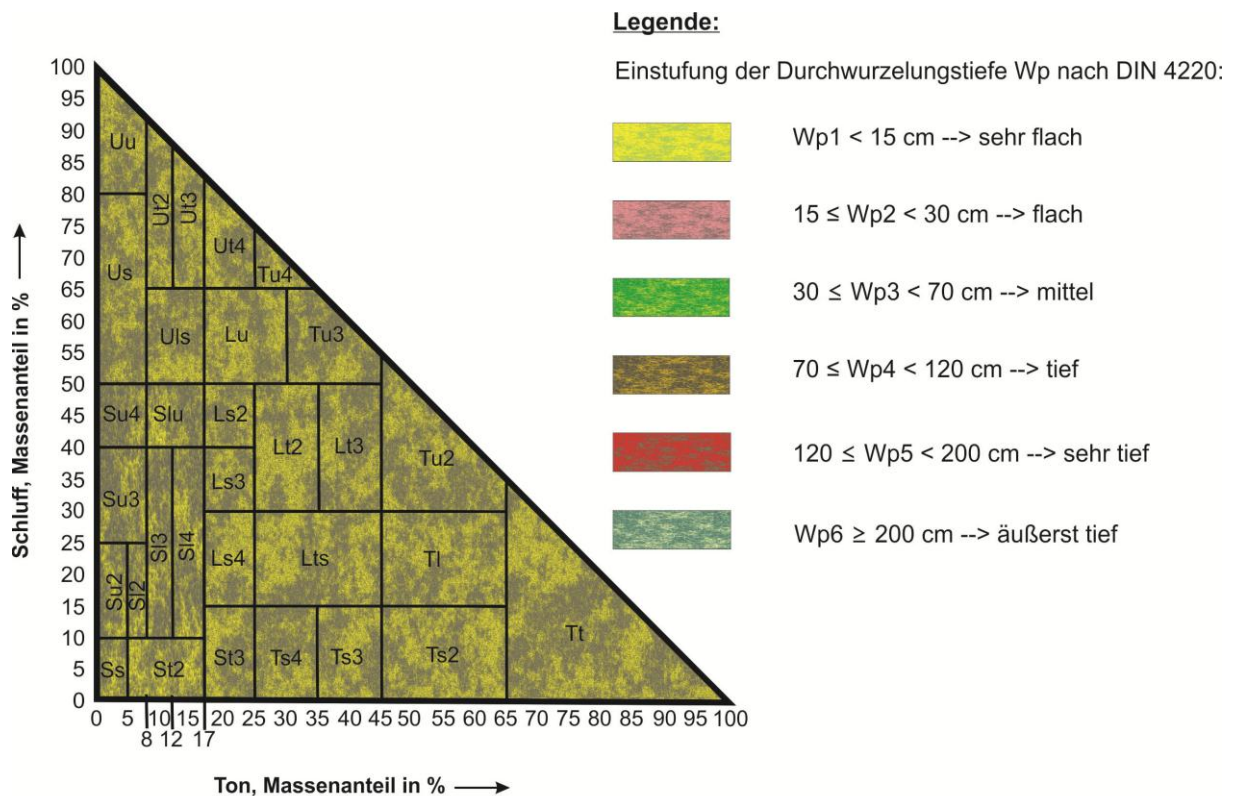
--> Wiesen-Flockenblume (*Centaurea jacea*) wurzelt bis ca. 250 cm
 --> Gewöhnlicher Glatthafer (*Arrhenatherum elatius*) wurzelt bis ca. 150 cm
 --> Wiesen-Schwingel (*Festuca pratensis*) wurzelt bis ca. 140 cm

Mischung R:

--> Wiesensalbei (*Salvia pratensis*) wurzelt bis ca. 200 cm
 --> Kleine Wiesenknopf (*Sanguisorba minor*) wurzelt bis ca. 200 cm

Anlage 3.2-5

Ebene „Durchwurzelung“ für die Mischungen T – W



Mischung T:

--> Wiesen-Schwingel (*Festuca pratensis*) wurzelt bis ca. 140 cm

Mischung U:

--> Wiesen-Schwingel (*Festuca pratensis*) wurzelt bis ca. 140 cm

--> Glatthafer (*Arrhenatherum elatius*) wurzelt bis ca. 150 cm

Mischung V:

--> Wiesen-Flockenblume (*Centaurea jacea*) wurzelt bis ca. 250 cm

--> Hopfenklee (*Medicago lupulina*) wurzelt bis ca. 150 cm

--> Saat-Esparsette (*Onobrychis viciifolia*) wurzelt bis ca. 350 cm

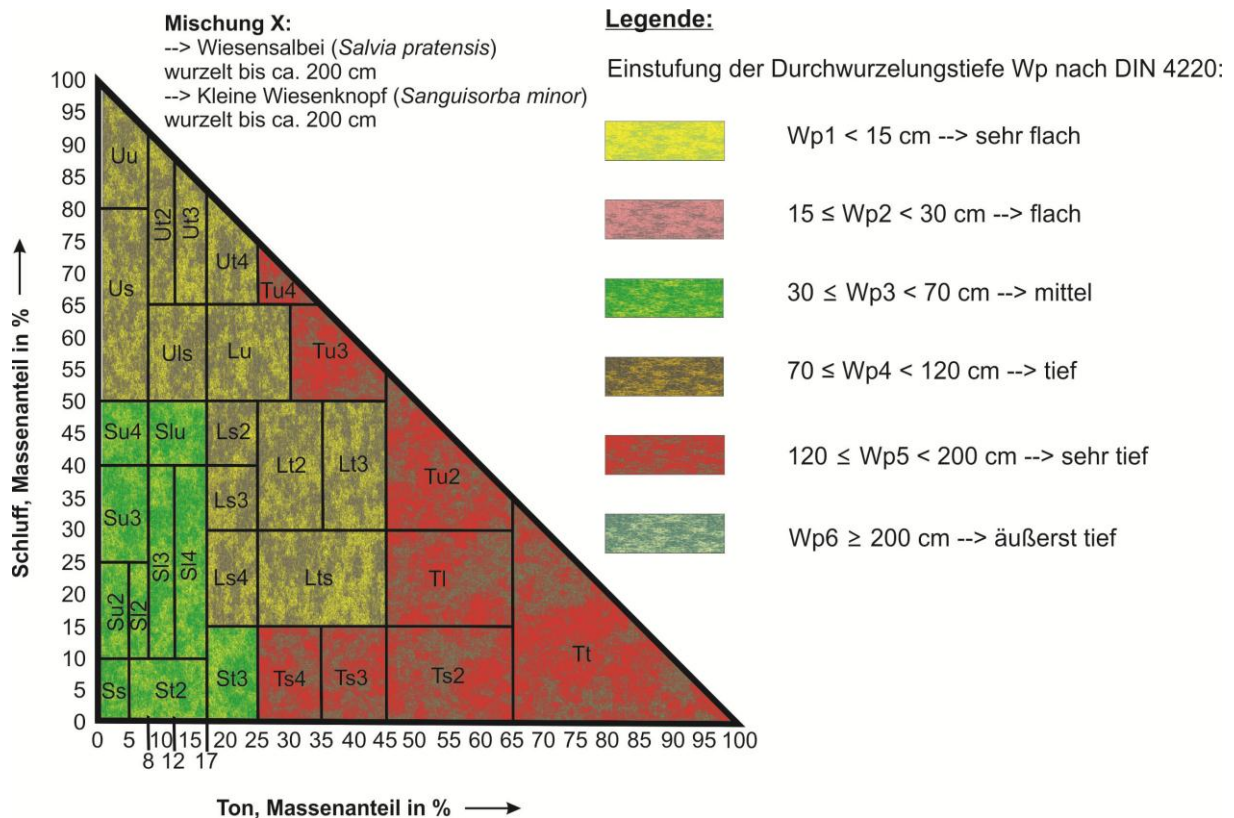
--> Wiesen-Salbei (*Salvia pratensis*) wurzelt bis ca. 200 cm

Mischung W:

--> Rohr-Schwingel (*Festuca arundinacea*) wurzelt bis ca. 280 cm

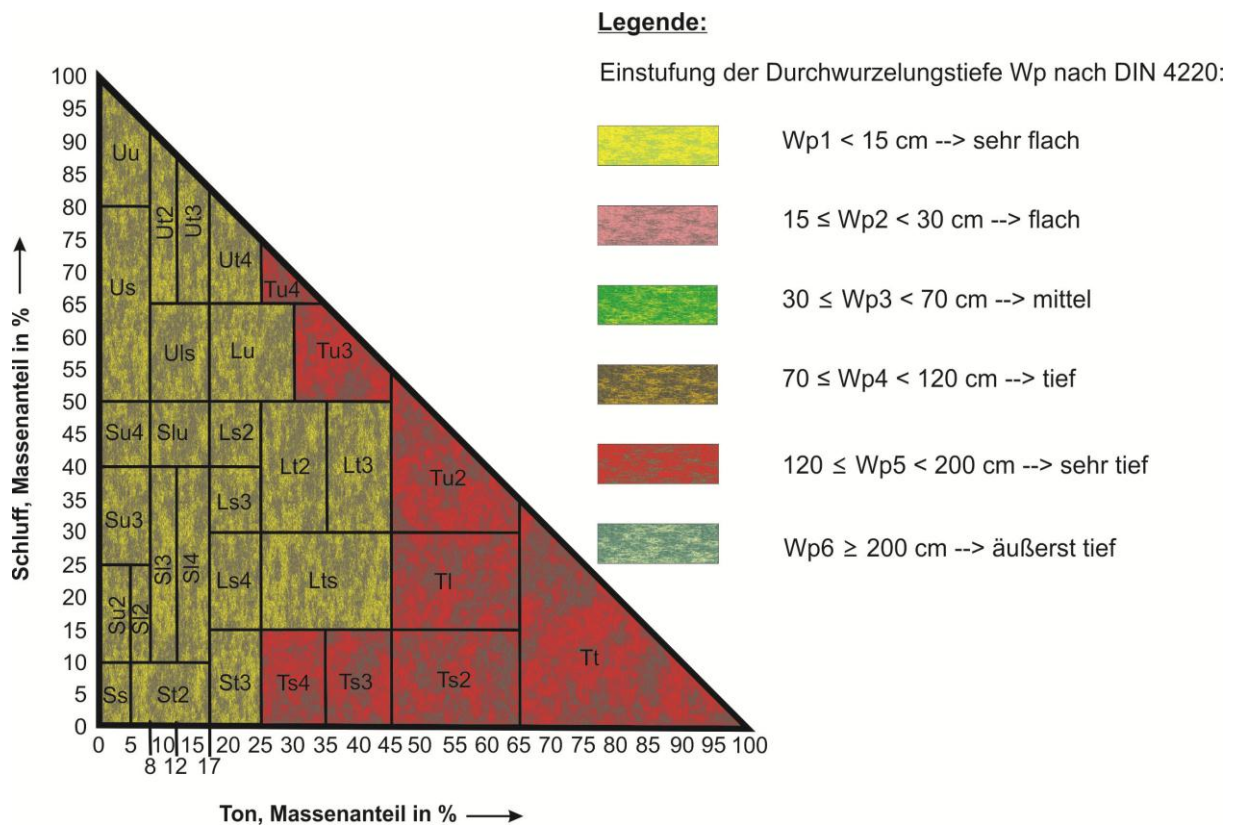
Anlage 3.2-6

Ebene „Durchwurzelung“ für die Mischung X



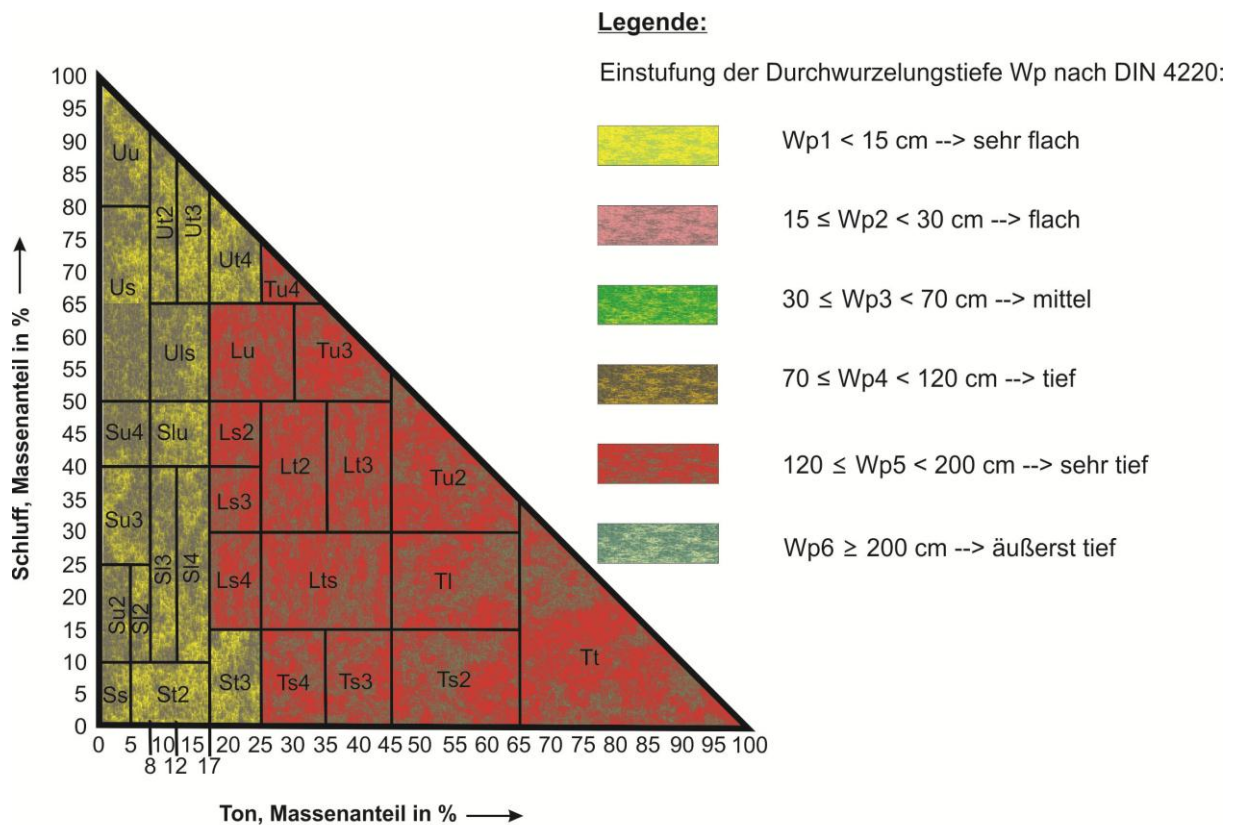
Anlage 3.2-7

Ebene „Durchwurzelung“ für die Mischung Y



Anlage 3.2-8

Ebene „Durchwurzelung“ für die Mischung Z

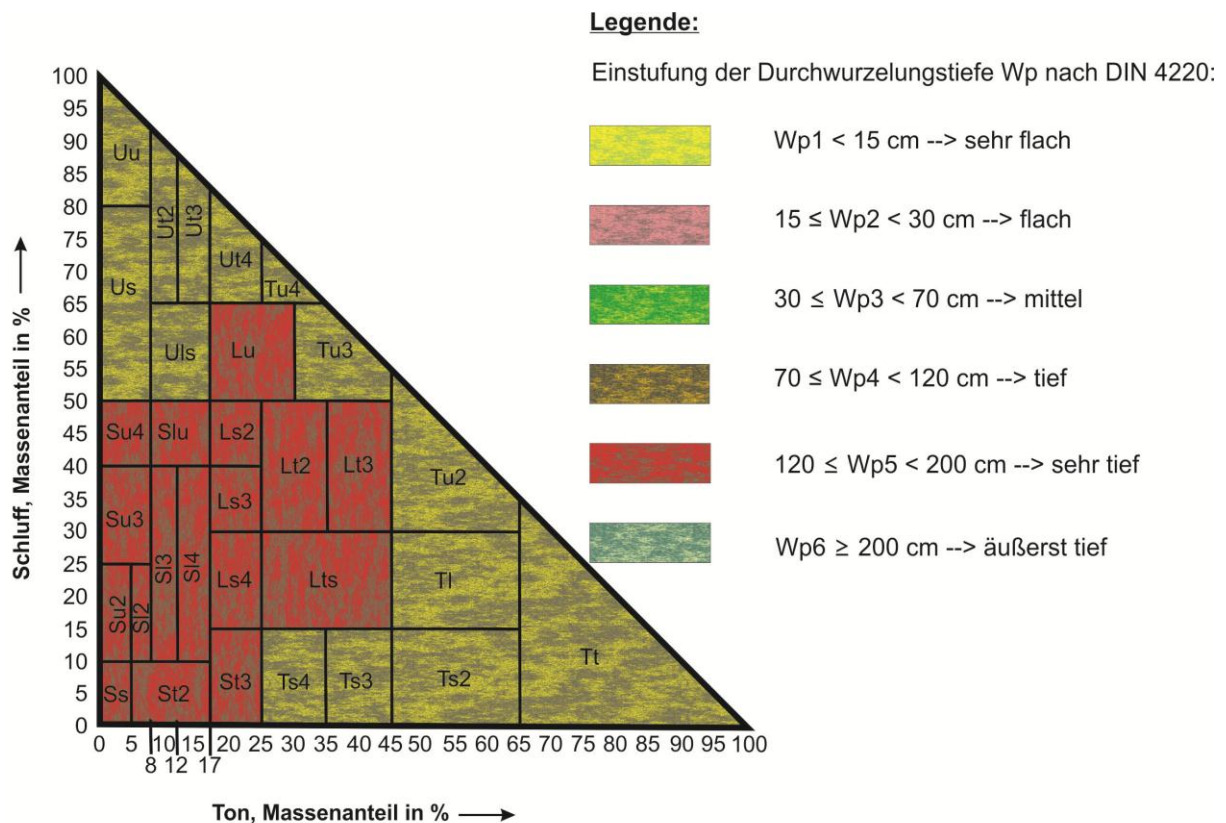


Mischung Z:

- > Wiesensalbei (*Salvia pratensis*) wurzelt bis ca. 200 cm
- > Kleine Wiesenknopf (*Sanguisorba minor*) wurzelt bis ca. 200 cm
- > Wiesen-Flockenblume (*Centaurea jacea*) wurzelt bis 250 cm
- > Skabiosen-Flockenblume (*Centaurea scabiosa*) wurzelt bis ca. 200 cm

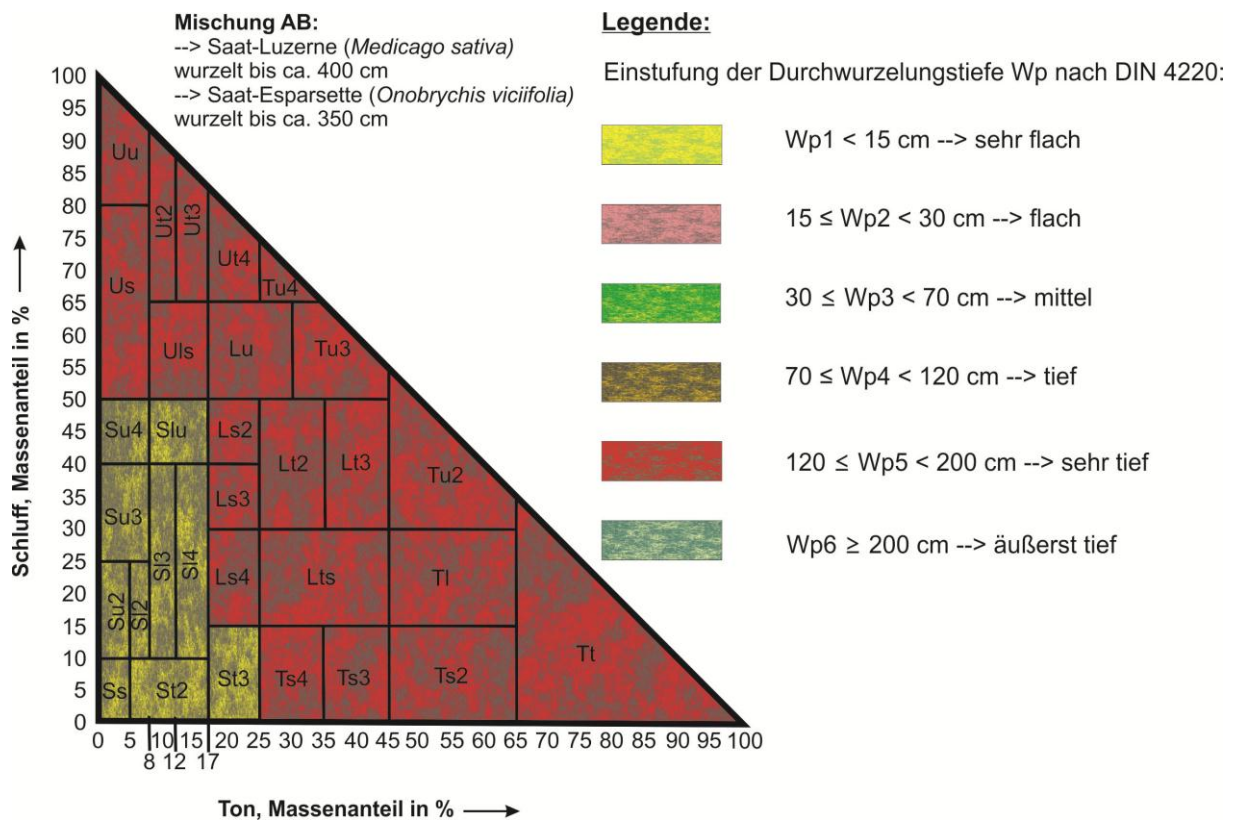
Anlage 3.2-9

Ebene „Durchwurzelung“ für die Mischung AA



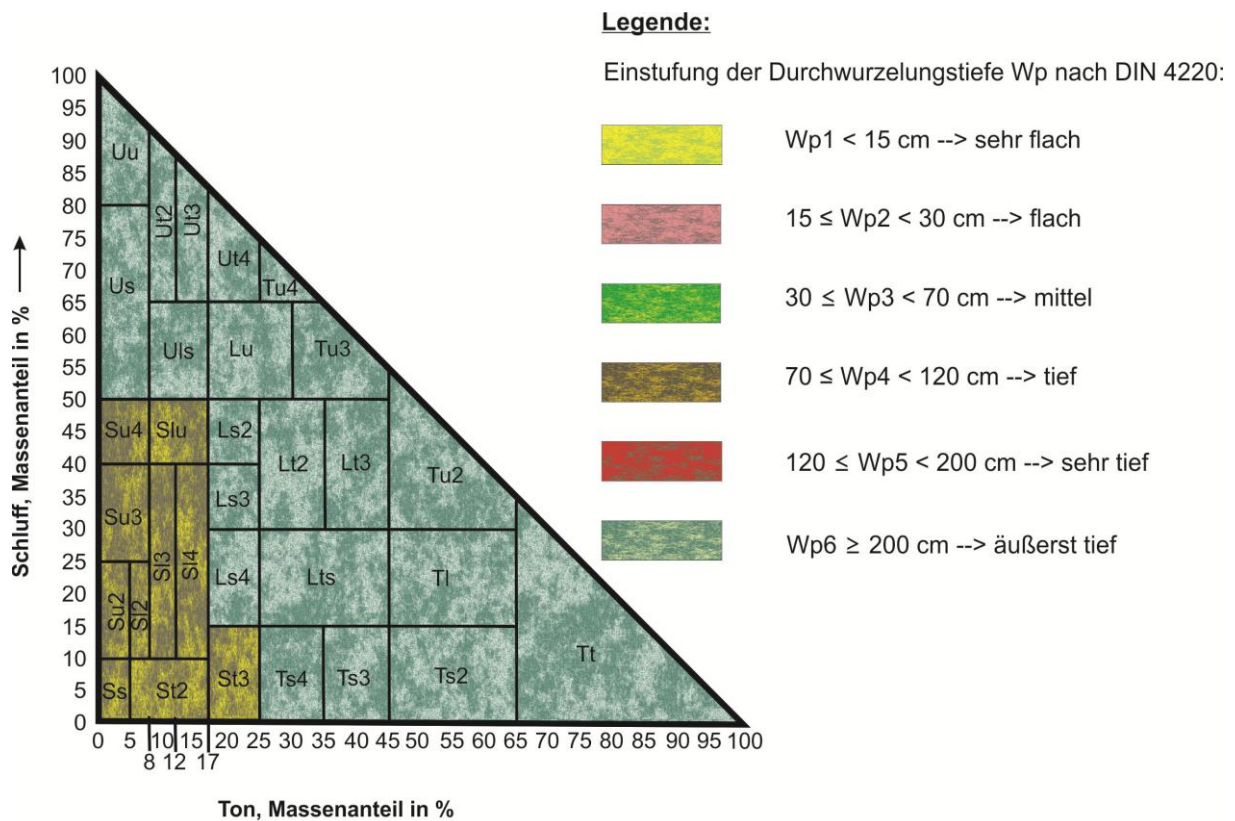
Anlage 3.2-10

Ebene „Durchwurzelung“ für die Mischung AB



Anlage 3.2-11

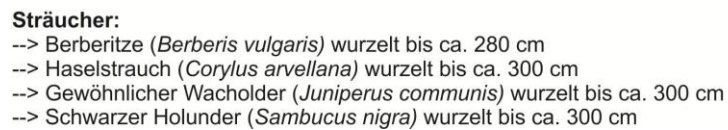
Ebene „Durchwurzelung“ für die Mischung AC



Mischung AC:

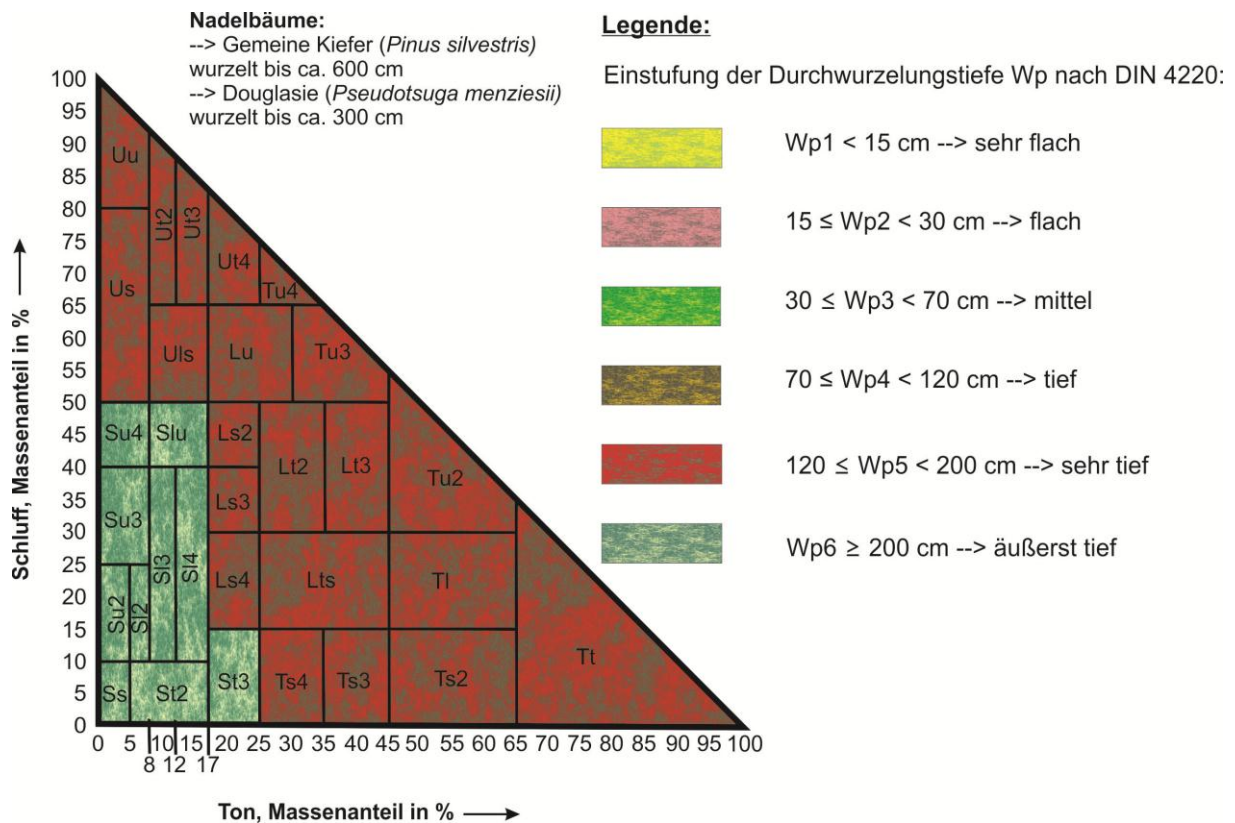
- > Skabiosen-Flockenblume (*Centaurea scabiosa*) wurzelt bis ca. 200 cm
- > Saat-Luzerne (*Medicago sativa*) wurzelt bis ca. 400 cm
- > Saat-Esparsette (*Onobrychis viciifolia*) wurzelt bis ca. 350 cm
- > Kleiner Wiesenknopf (*Sanguisorba minor*) wurzelt bis ca. 200 cm

Ebene „Durchwurzelung“ für Sträucher



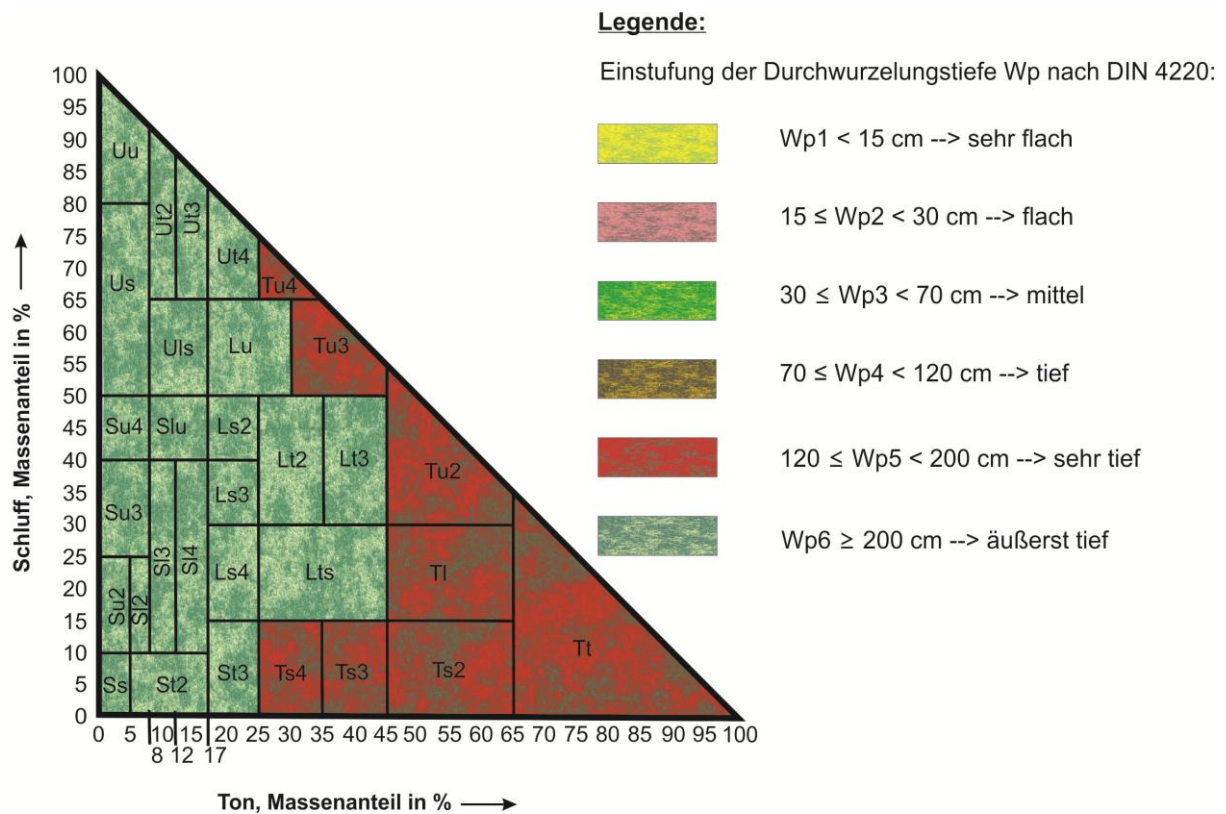
Anlage 3.2-13

Ebene „Durchwurzelung“ für Nadelbäume



Anlage 3.2-14

Ebene „Durchwurzelung“ für Laubbäume



Laubbäume:

- > Ahorn (*Acer sp.*) wurzelt bis ca. 350 cm
- > Erle (*Alnus sp.*) wurzelt bis ca. 360 cm
- > Sandbirke (*Betula pendula*) wurzelt bis ca. 400 cm
- > Rotbuche (*Fagus silvatica*) wurzelt bis ca. 300 cm
- > Pappel (*Populus sp.*) wurzelt bis ca. 260 cm
- > Eiche (*Quercus sp.*) wurzelt bis ca. 400 cm
- > Robinie (*Robinia pseudoacacia*) wurzelt bis ca. 300 cm
- > Weide (*Salix sp.*) wurzelt bis ca. 300 cm
- > Ulme (*Alnus sp.*) wurzelt bis ca. 350 cm

Anlage 3.3:
Ebene „Standicherheit“

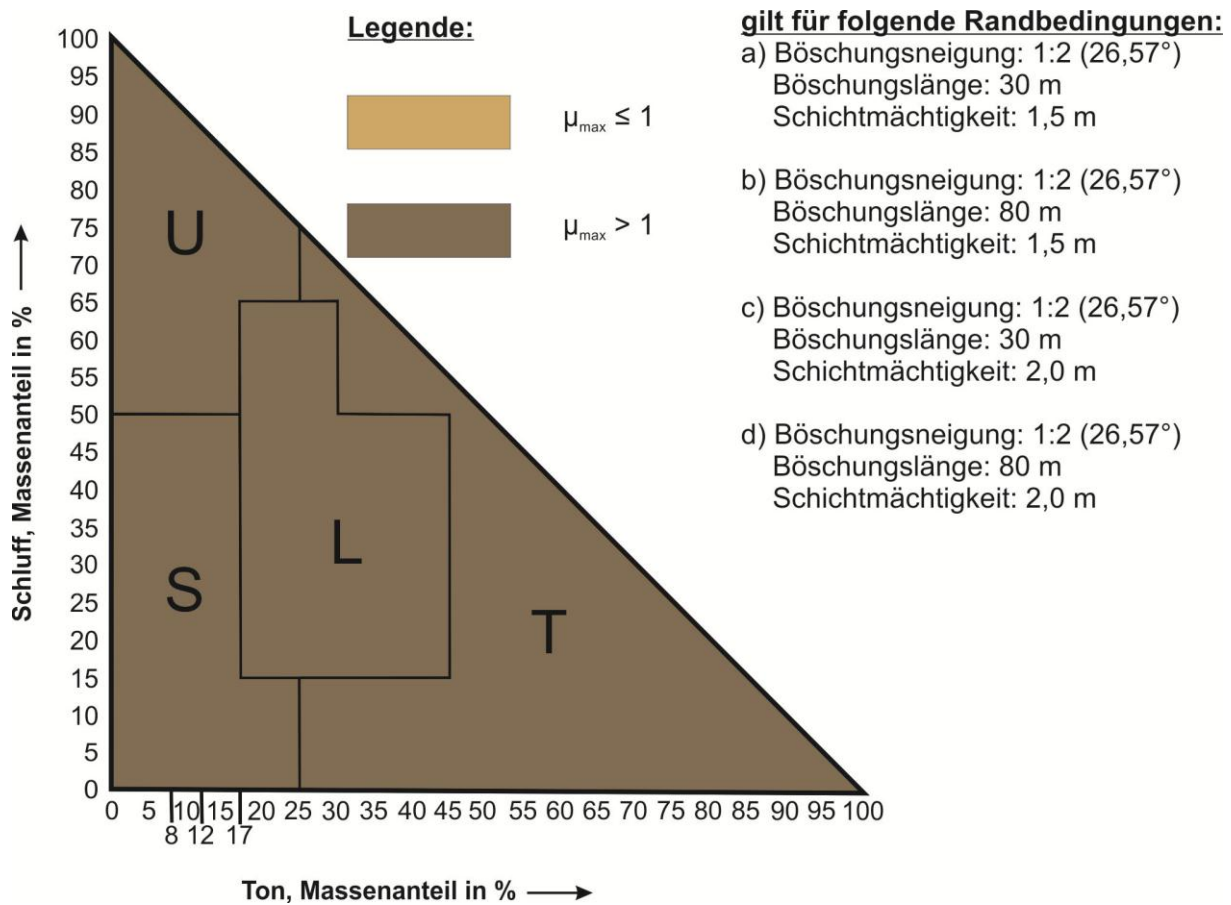
Anlage 3.3-1

Ebene „Standicherheit“ für die Randbedingungen:

Böschungsneigung: 1:2 (26,75°)

Böschungslänge: 30 m und 80 m

Schichtmächtigkeiten: 1,5 m und 2,0 m



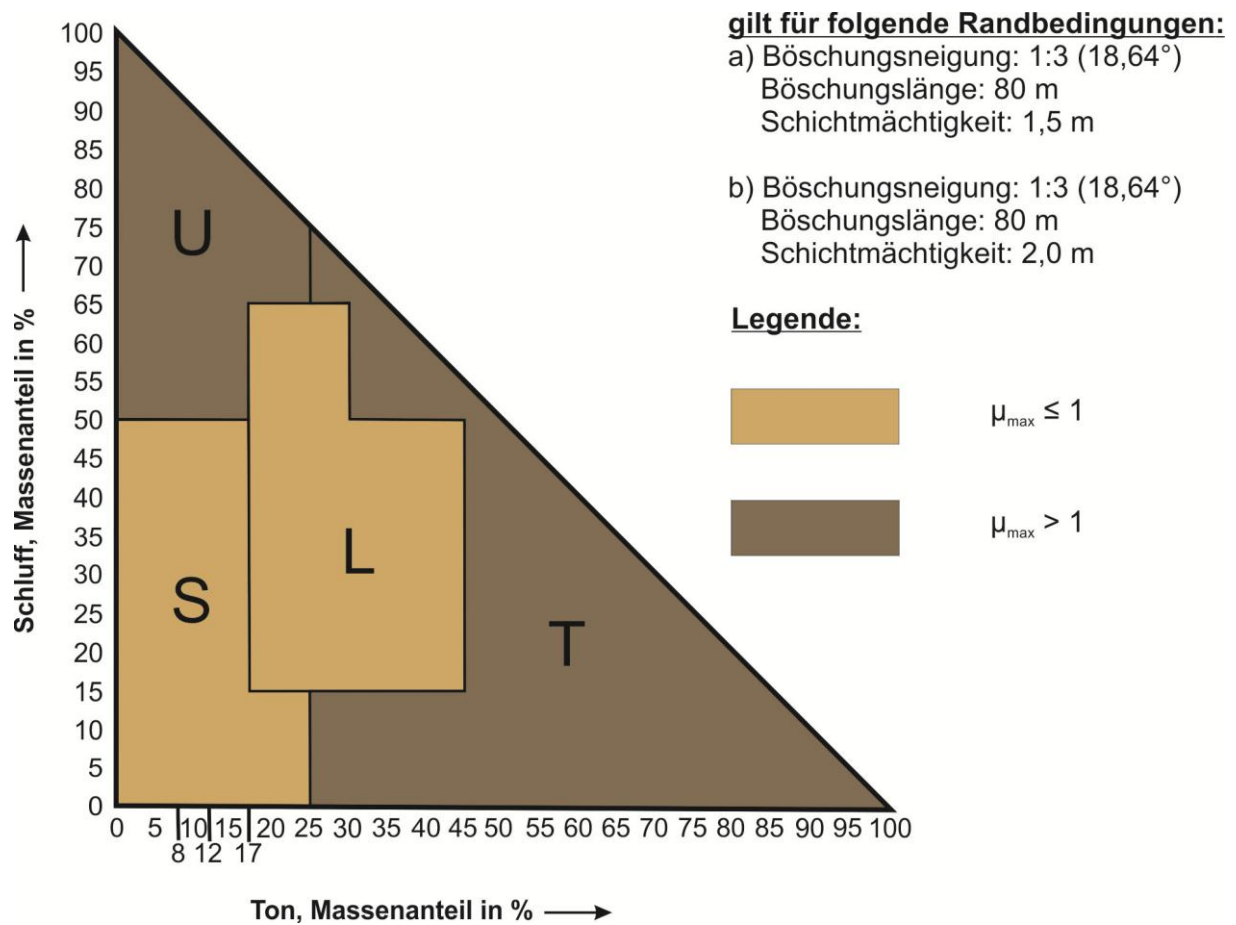
Anlage 3.3-2

Ebene „Standicherheit“ für die Randbedingungen:

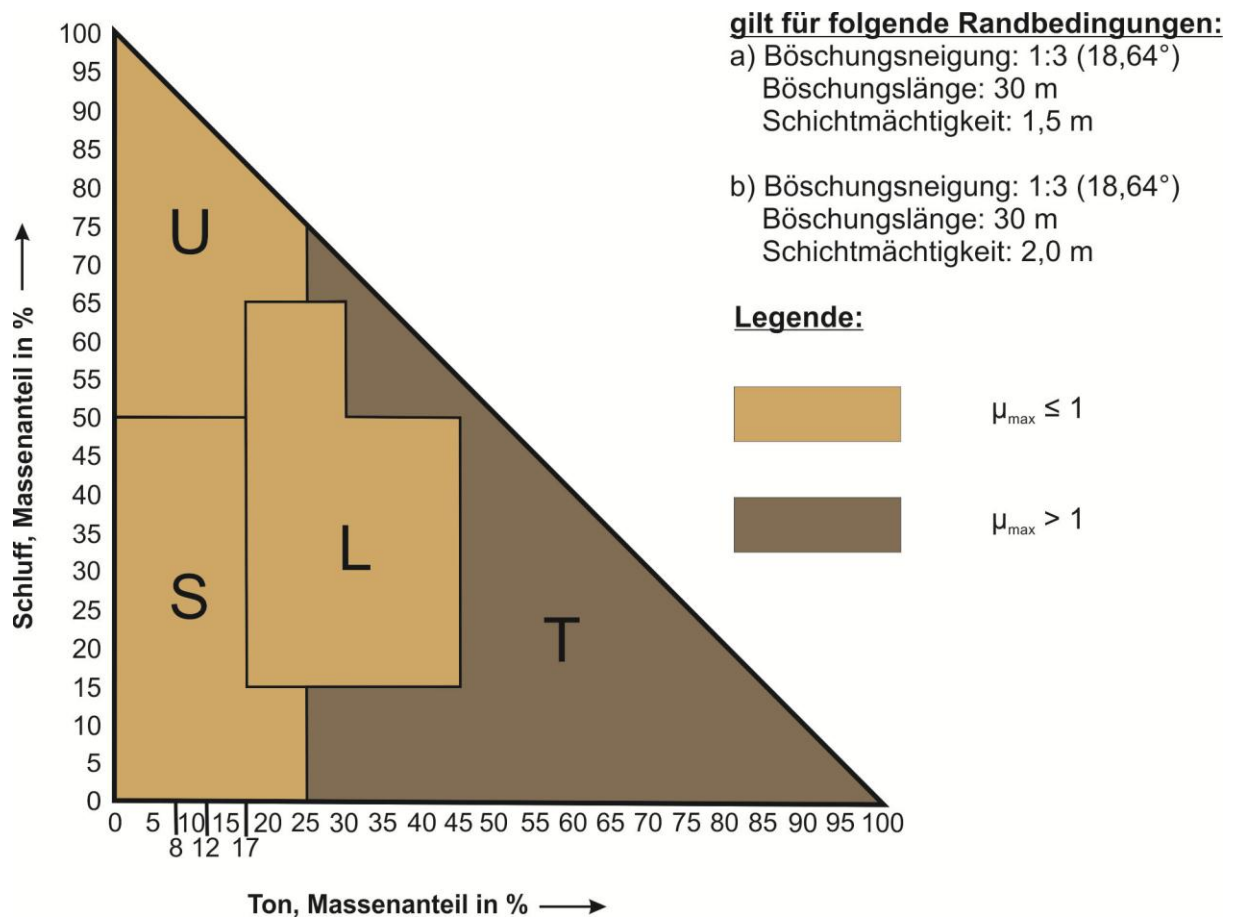
Böschungsneigung: 1:3 (18,64°)

Böschungslänge: 80 m

Schichtmächtigkeiten: 1,5 m und 2,0 m



Schichtmächtigkeiten: 1,5 m und 2,0 m



Anlage 4:

Graphische Nachweise der Standsicherheitsuntersuchungen für ausgewählte Bodenarten bei definierten Randbedingungen

Anlage 4.1:

Bodenart: Sand

Anlage 4.1-1

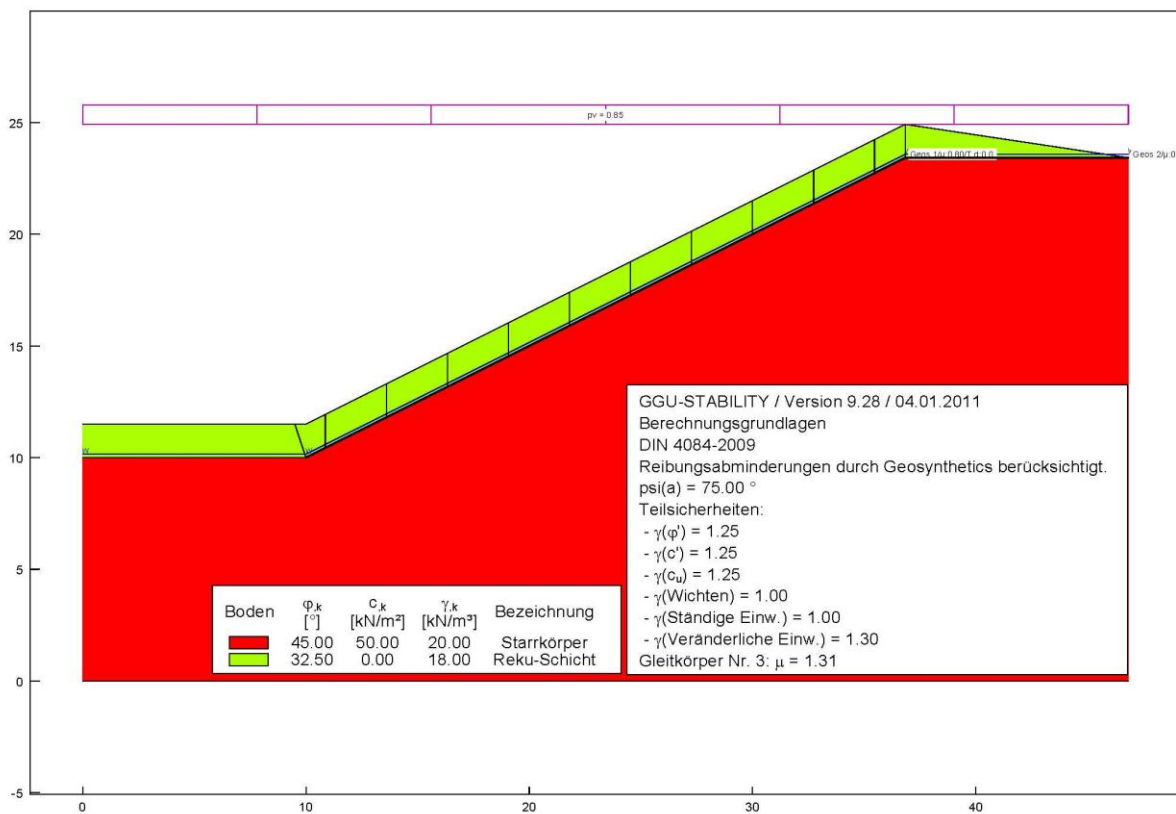
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Sand

Böschungsneigung: 1:2 (26,75°)

Böschungslänge: 30 m

Schichtmächtigkeiten: 1,5 m



Anlage 4.1-2

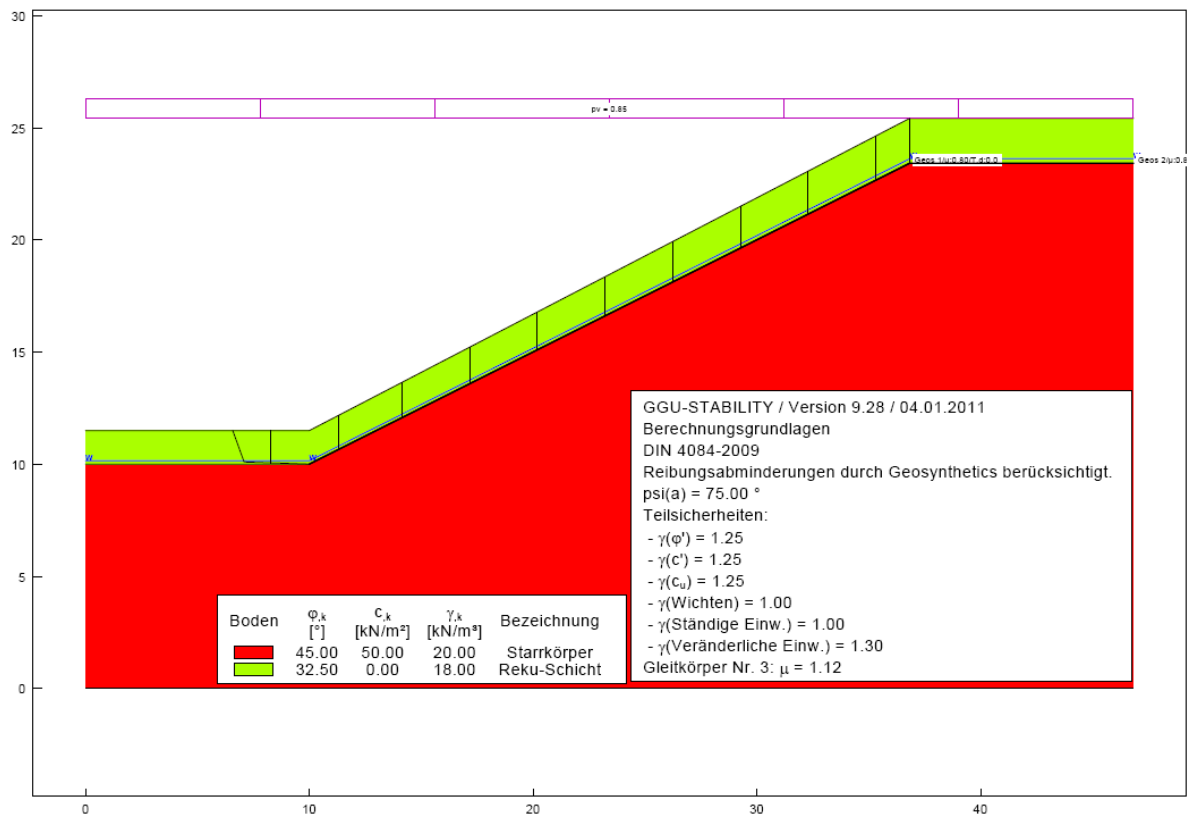
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Sand

Böschungsneigung: 1:2 (26,75°)

Böschungslänge: 30 m

Schichtmächtigkeiten: 2,0 m



Anlage 4.1-3

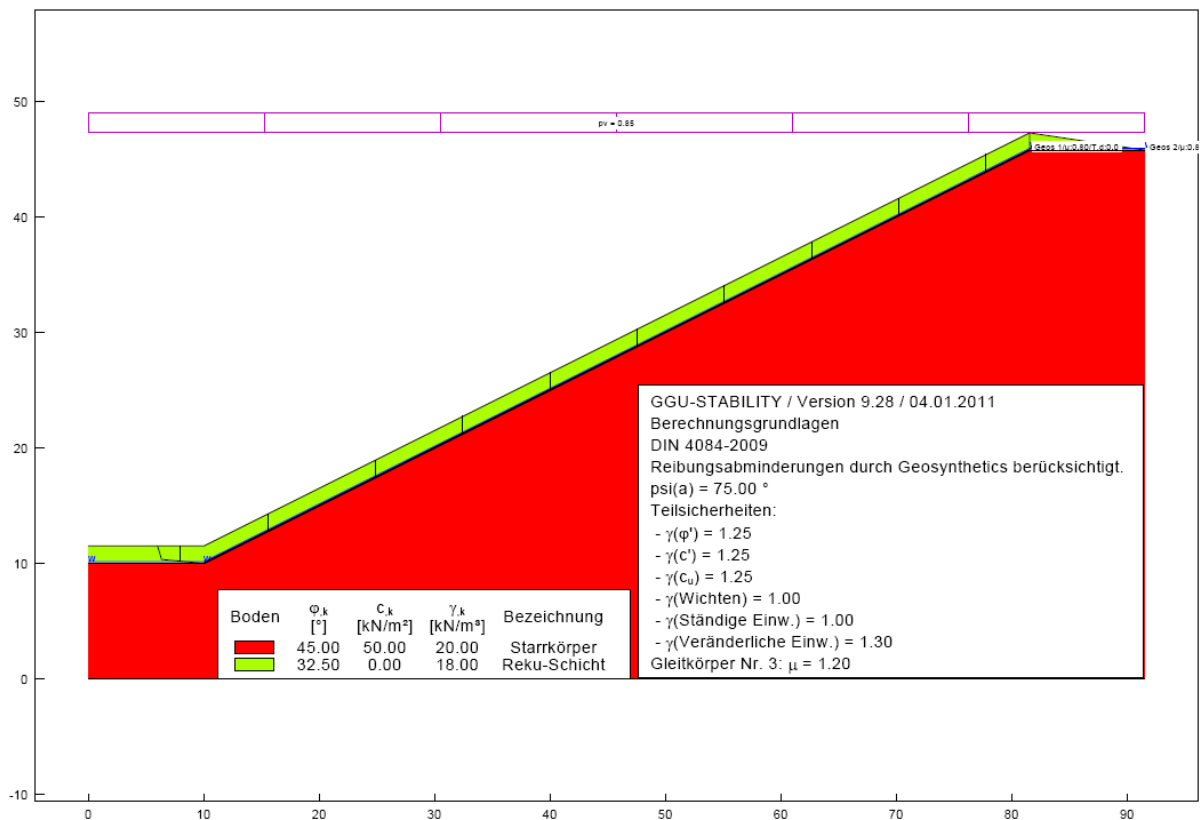
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Sand

Böschungsneigung: 1:2 (26,75°)

Böschungslänge: 80 m

Schichtmächtigkeiten: 1,5 m



Anlage 4.1-4

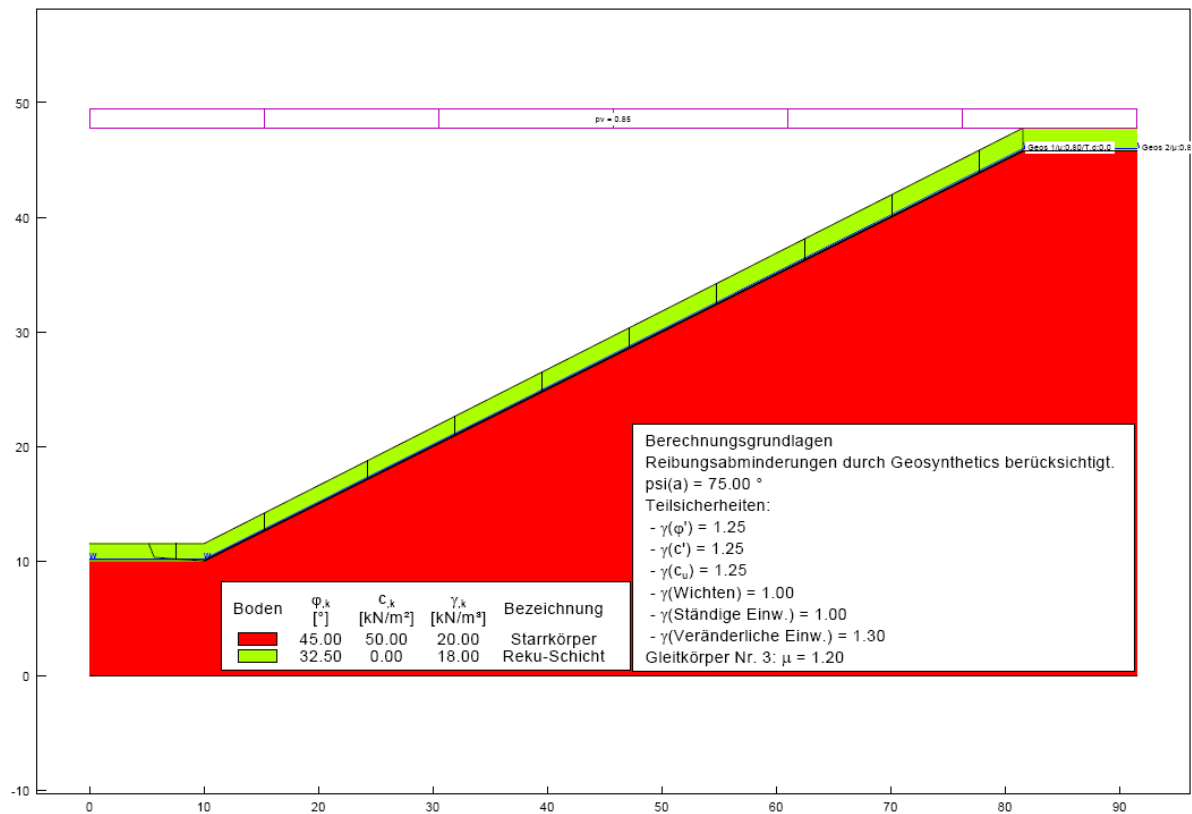
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Sand

Böschungsneigung: 1:2 (26,75°)

Böschungslänge: 80 m

Schichtmächtigkeiten: 2,0 m



Anlage 4.1-5

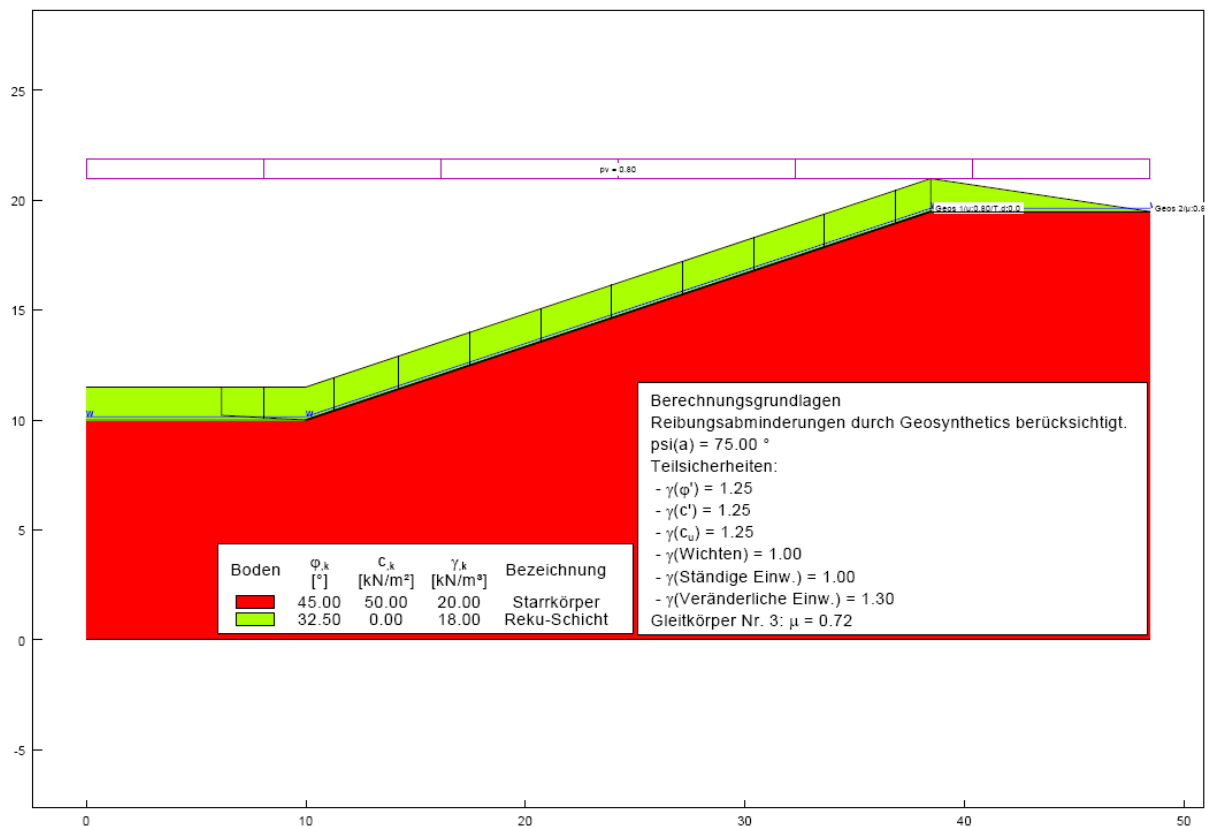
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Sand

Böschungsneigung: 1:3 (18,64°)

Böschungslänge: 30 m

Schichtmächtigkeiten: 1,5 m



Anlage 4.1-6

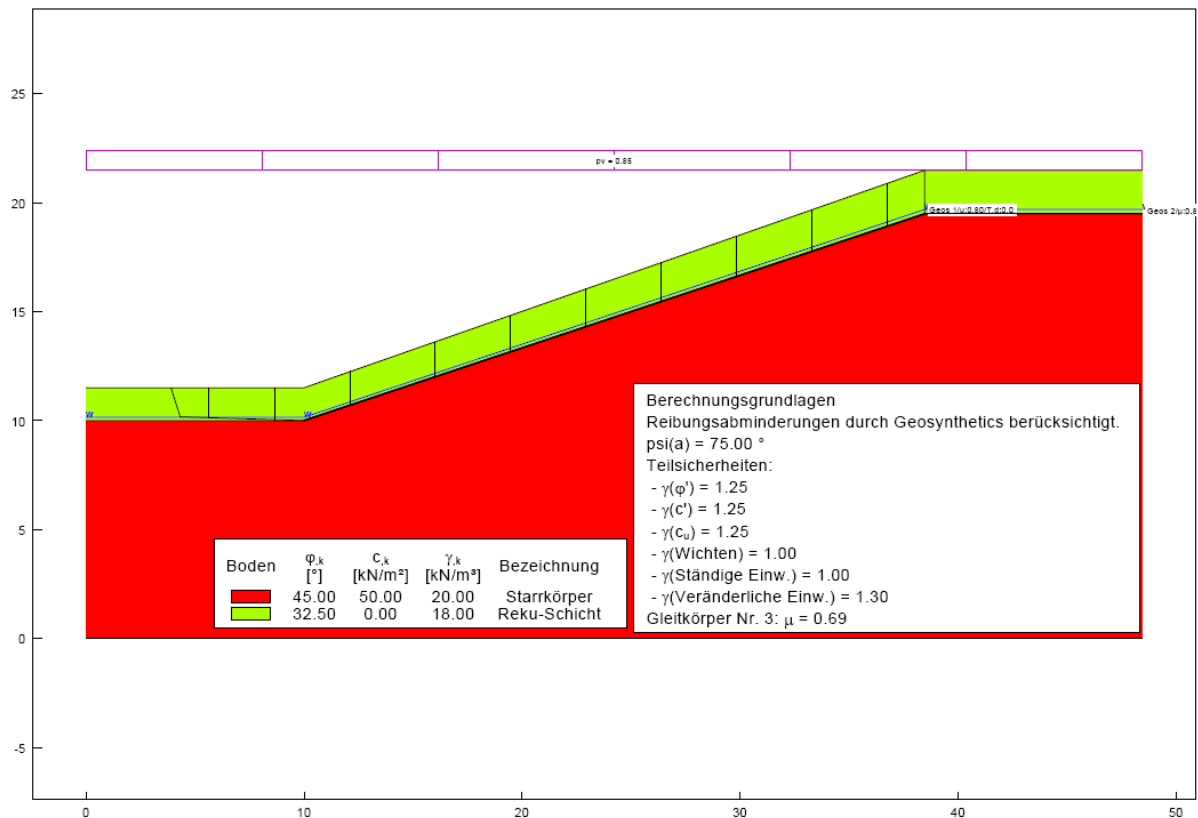
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Sand

Böschungsneigung: 1:3 (18,64°)

Böschungslänge: 30 m

Schichtmächtigkeiten: 2,0 m



Anlage 4.1-7

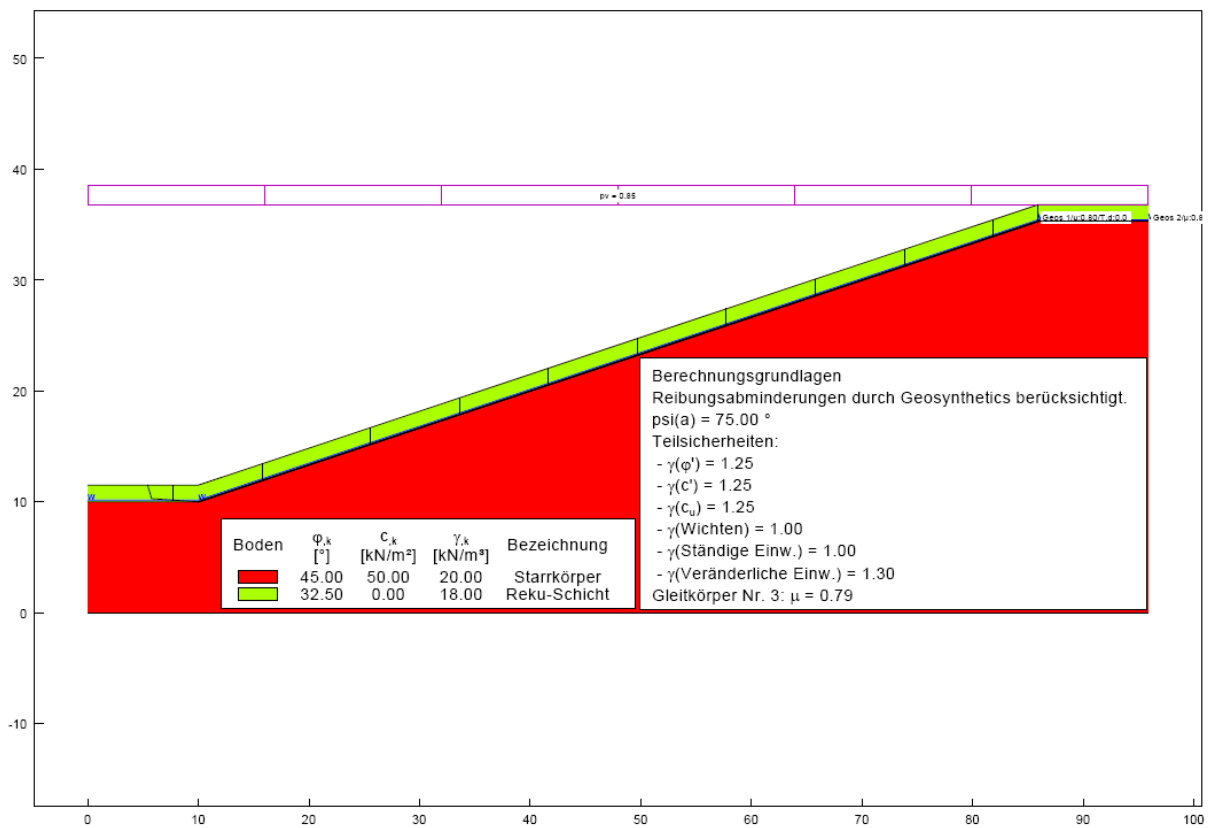
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Sand

Böschungsneigung: 1:3 (18,64°)

Böschungslänge: 80 m

Schichtmächtigkeiten: 1,5 m



Anlage 4.1-8

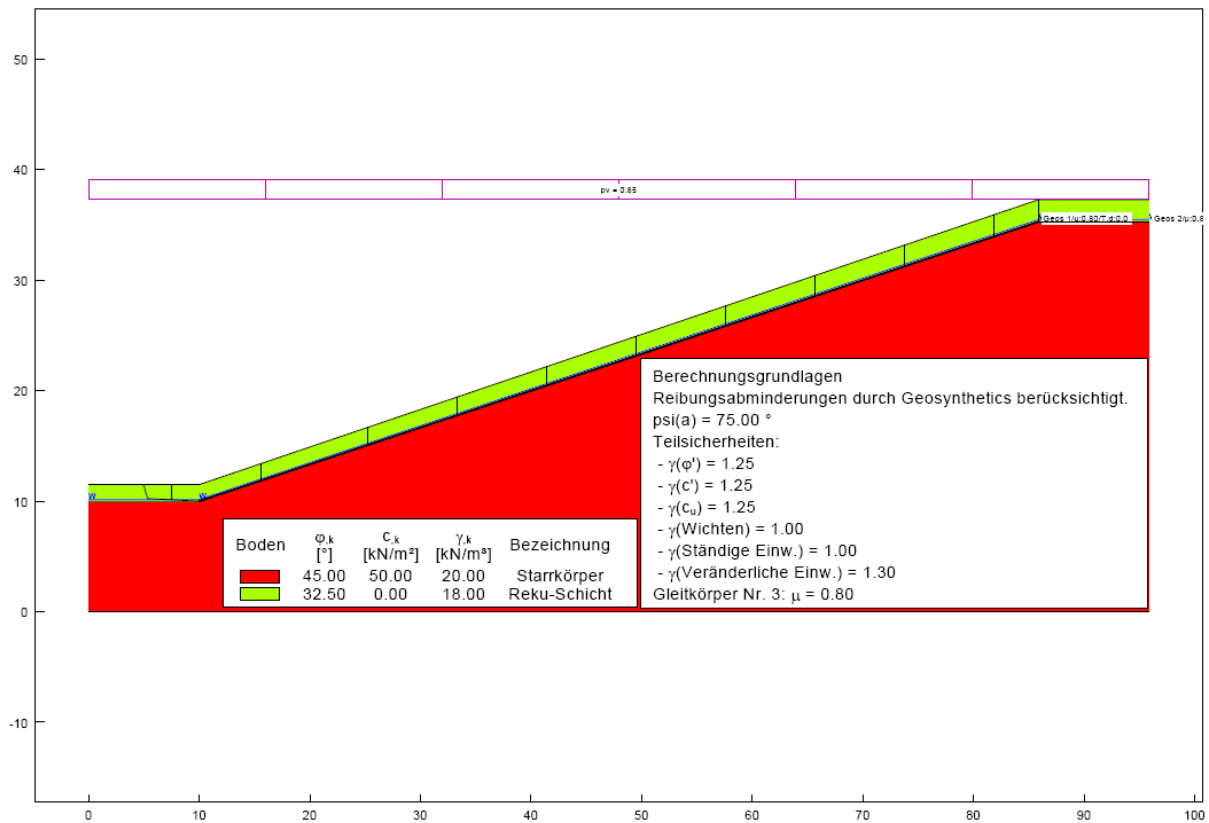
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Sand

Böschungsneigung: 1:3 (18,64°)

Böschungslänge: 80 m

Schichtmächtigkeiten: 2,0 m



Anlage 4.2:

Bodenart: Lehm

Anlage 4.2-1

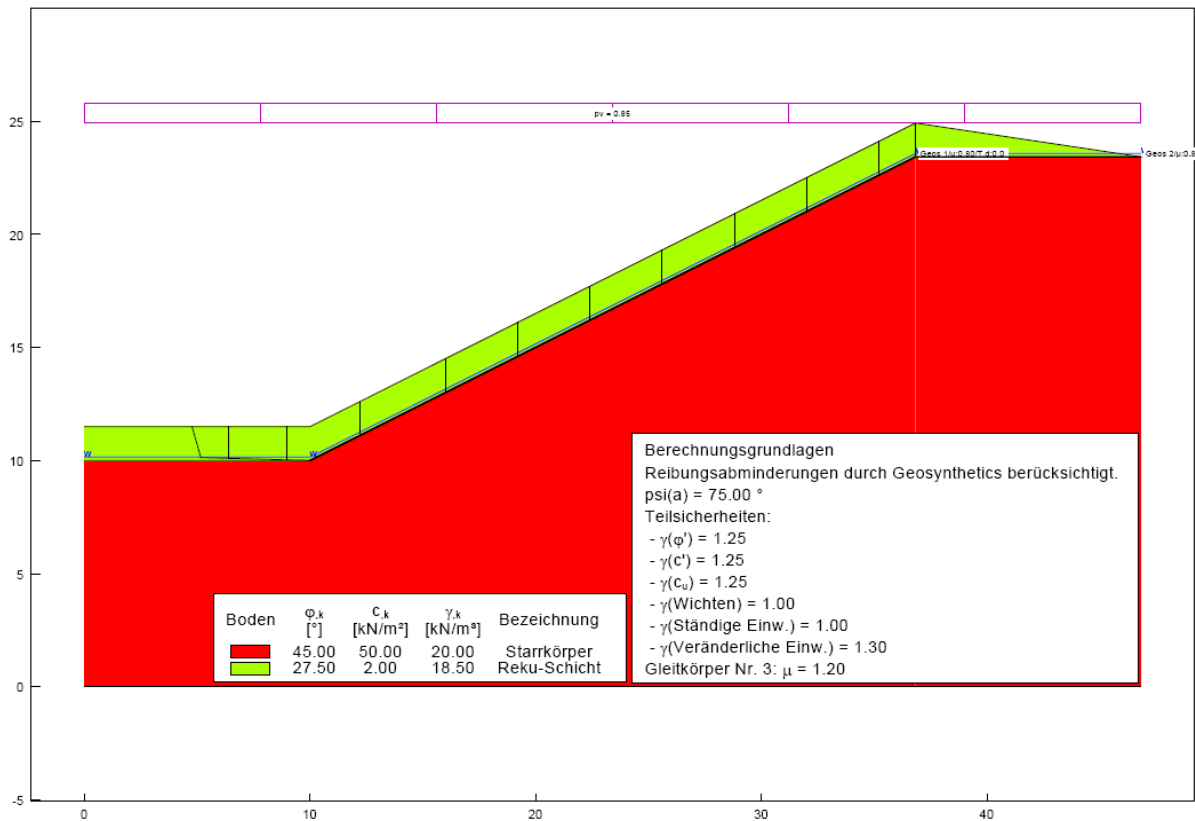
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Lehm

Böschungsneigung: 1:2 (26,75°)

Böschungslänge: 30 m

Schichtmächtigkeiten: 1,5 m



Anlage 4.2-2

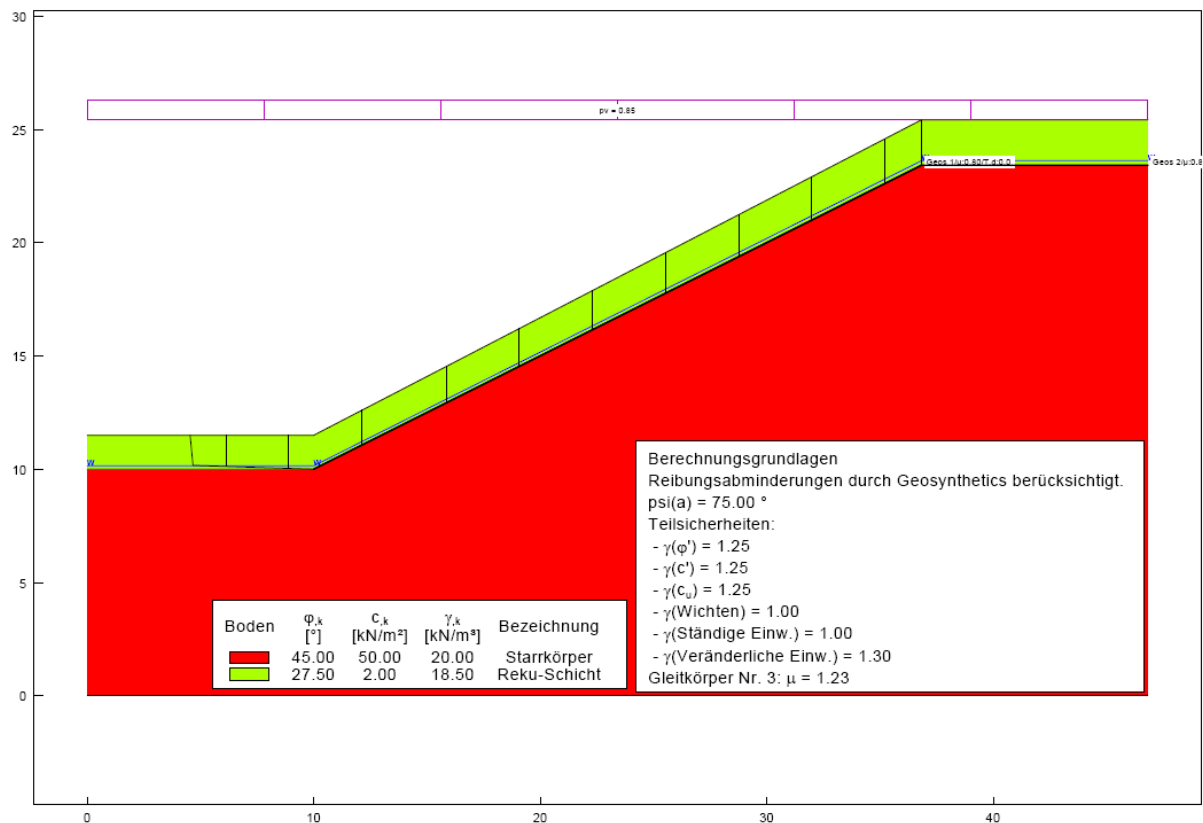
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Lehm

Böschungsneigung: 1:2 (26,75°)

Böschungslänge: 30 m

Schichtmächtigkeiten: 2,0 m



Anlage 4.2-3

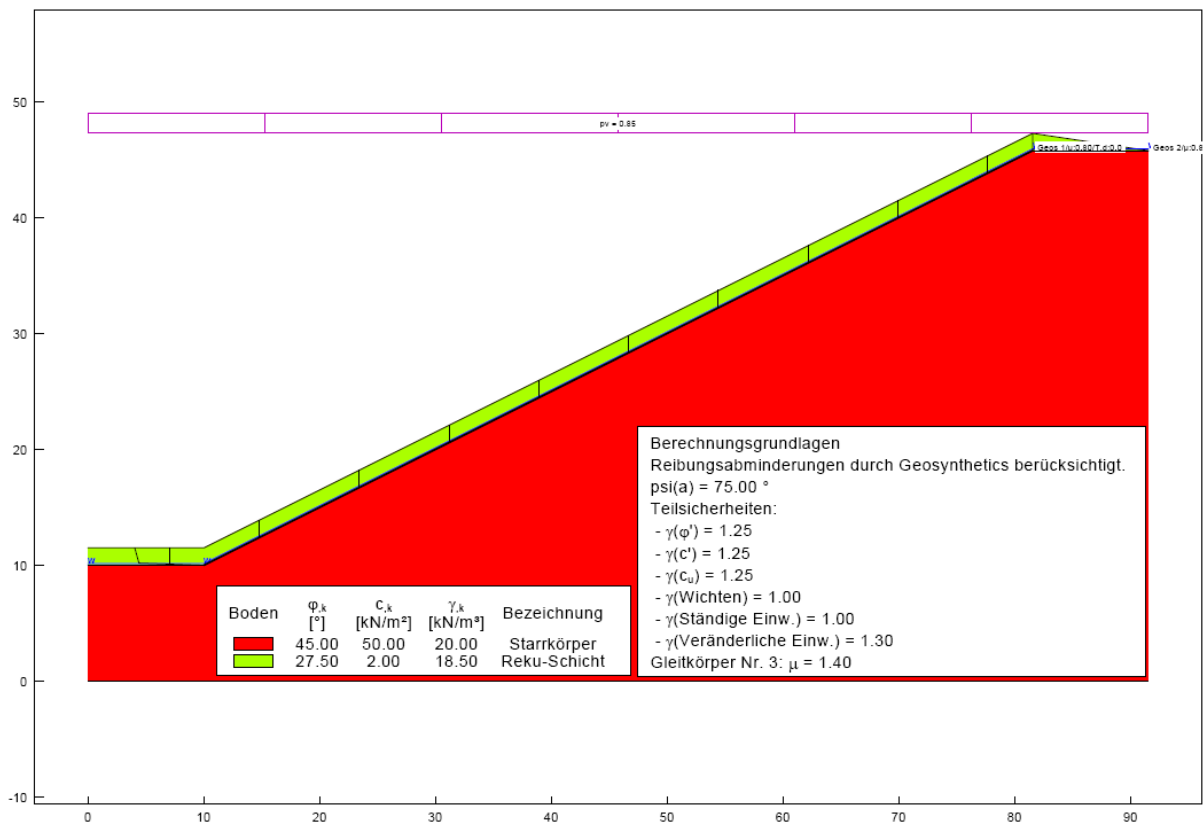
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Lehm

Böschungsneigung: 1:2 (26,75°)

Böschungslänge: 80 m

Schichtmächtigkeiten: 1,5 m



Anlage 4.2-4

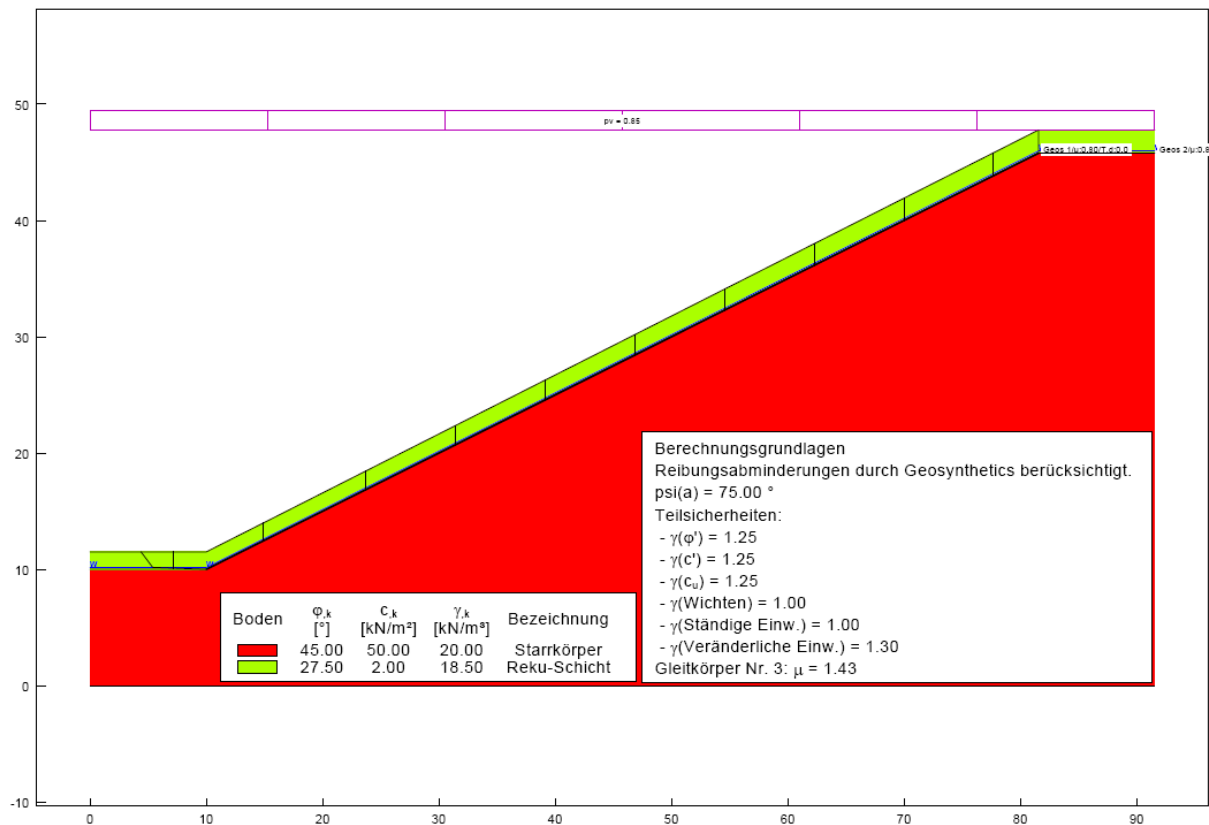
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Lehm

Böschungsneigung: 1:2 (26,75°)

Böschungslänge: 80 m

Schichtmächtigkeiten: 2,0 m



Anlage 4.2-5

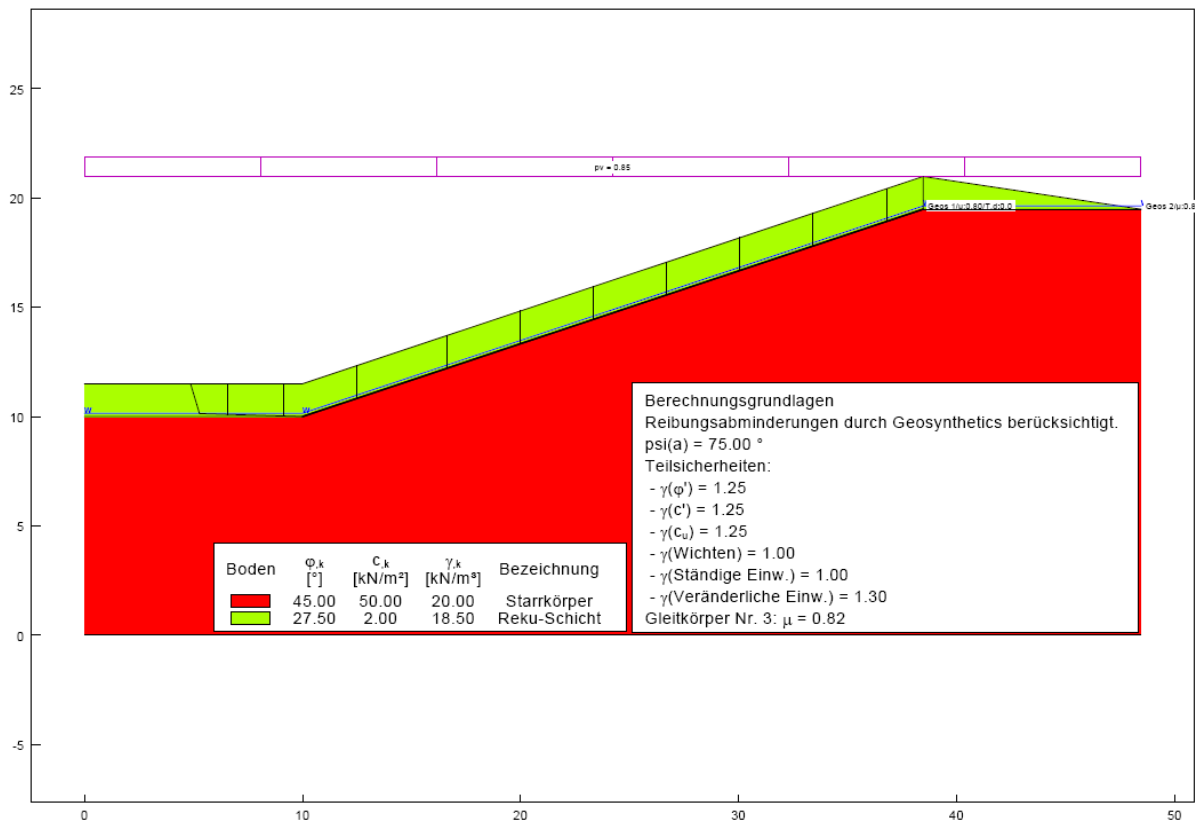
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Lehm

Böschungsneigung: 1:3 (18,64°)

Böschungslänge: 30 m

Schichtmächtigkeiten: 1,5 m



Anlage 4.2-6

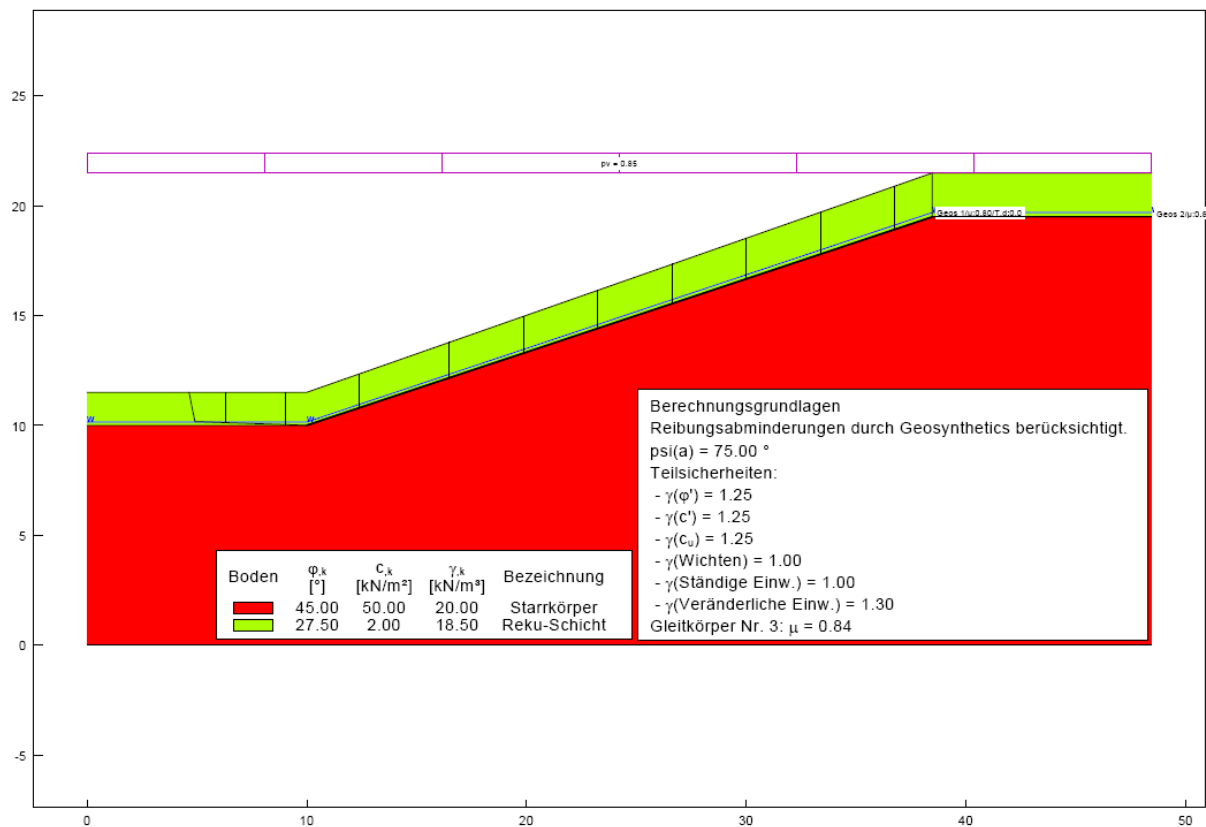
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Lehm

Böschungsneigung: 1:3 (18,64°)

Böschungslänge: 30 m

Schichtmächtigkeiten: 2,0 m



Anlage 4.2-7

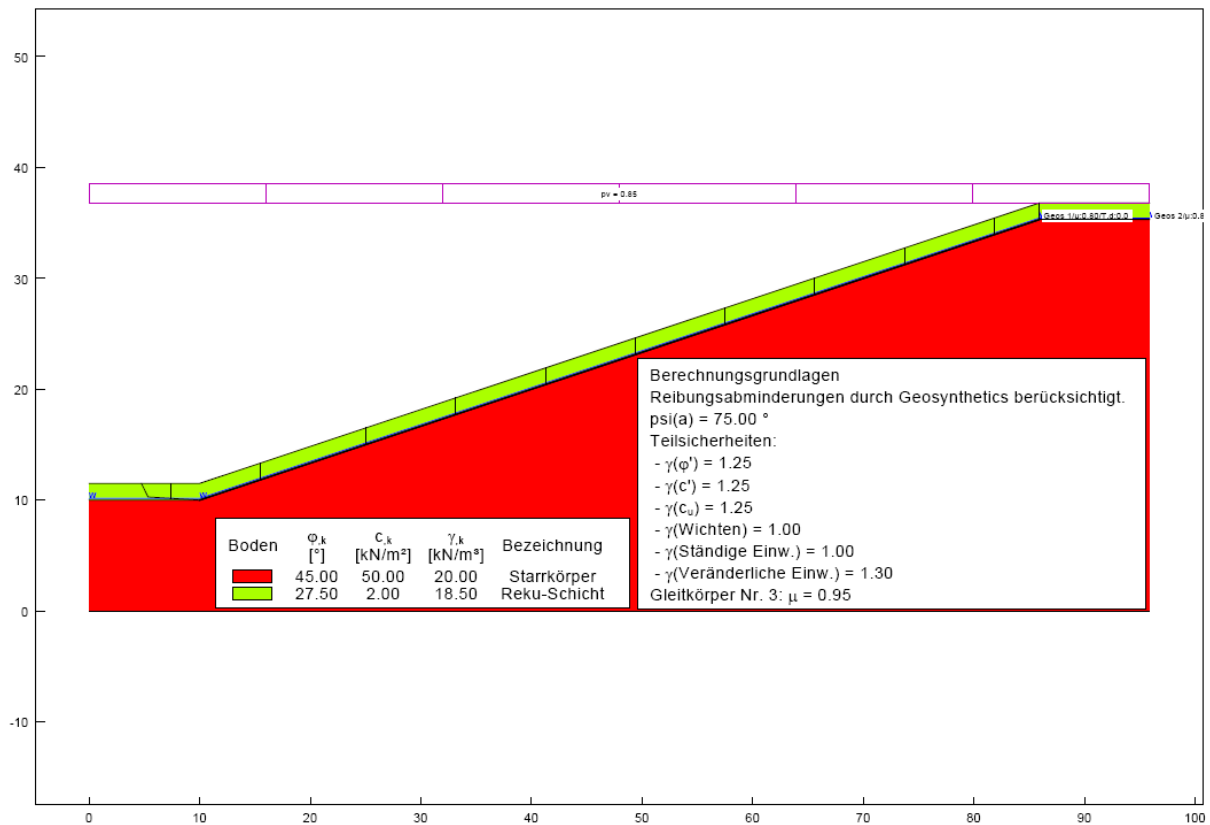
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Lehm

Böschungsneigung: 1:3 (18,64°)

Böschungslänge: 80 m

Schichtmächtigkeiten: 1,5 m



Anlage 4.2-8

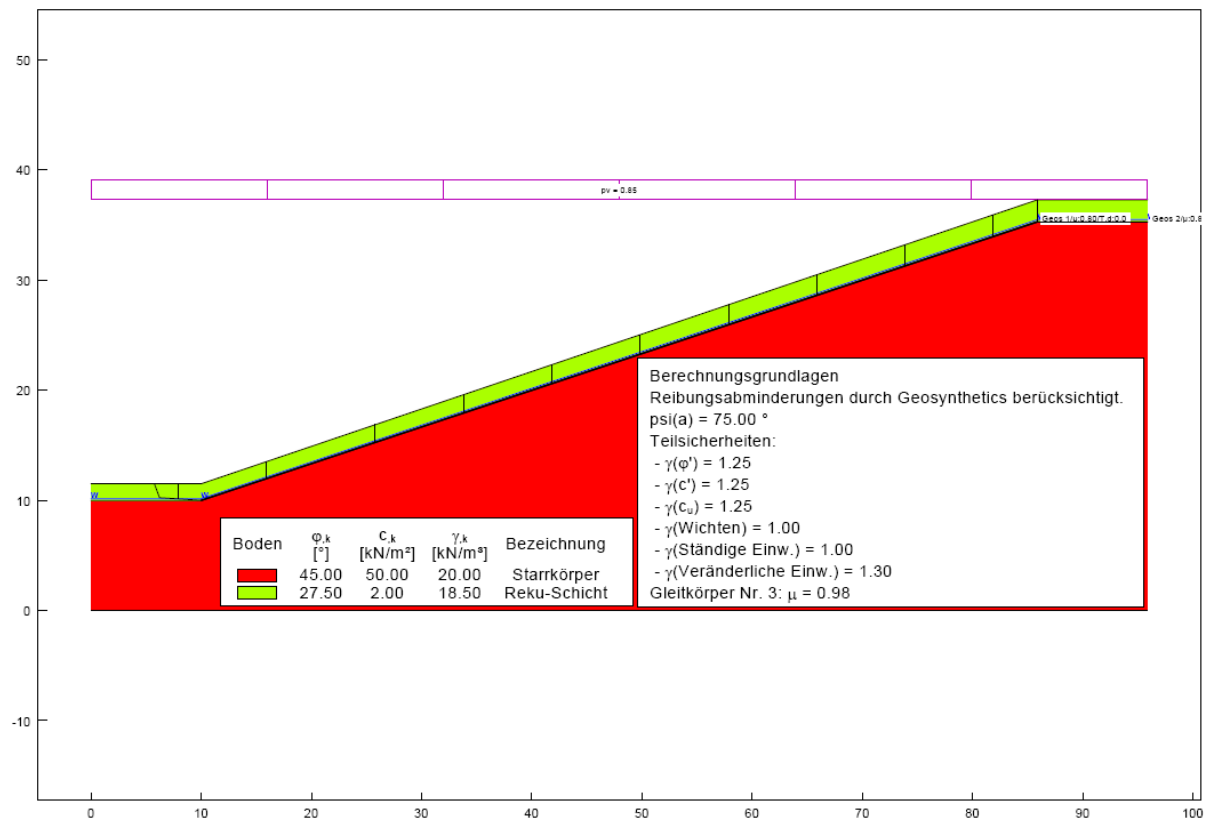
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Lehm

Böschungsneigung: 1:3 (18,64°)

Böschungslänge: 80 m

Schichtmächtigkeiten: 2,0 m



Anlage 4.3:

Bodenart: Schluff

Anlage 4.3-1

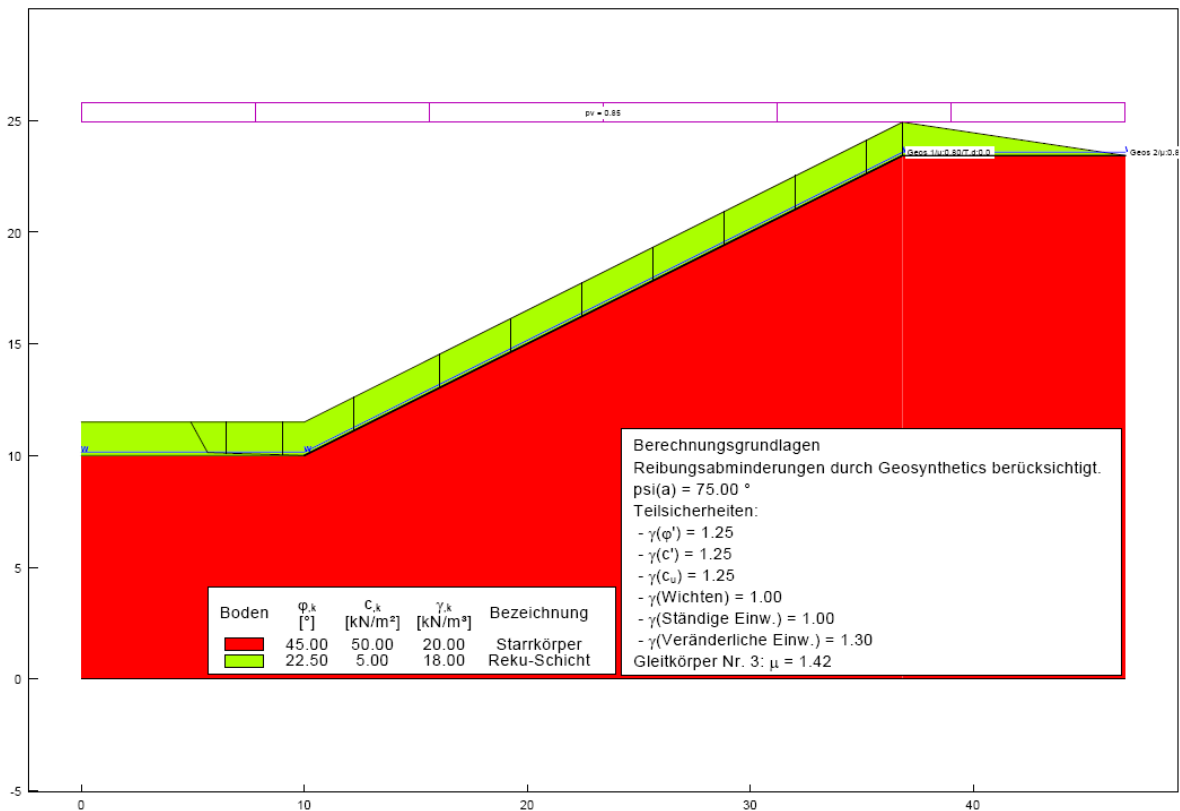
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Schluff

Böschungsneigung: 1:2 (26,75°)

Böschungslänge: 30 m

Schichtmächtigkeiten: 1,5 m



Anlage 4.3-2

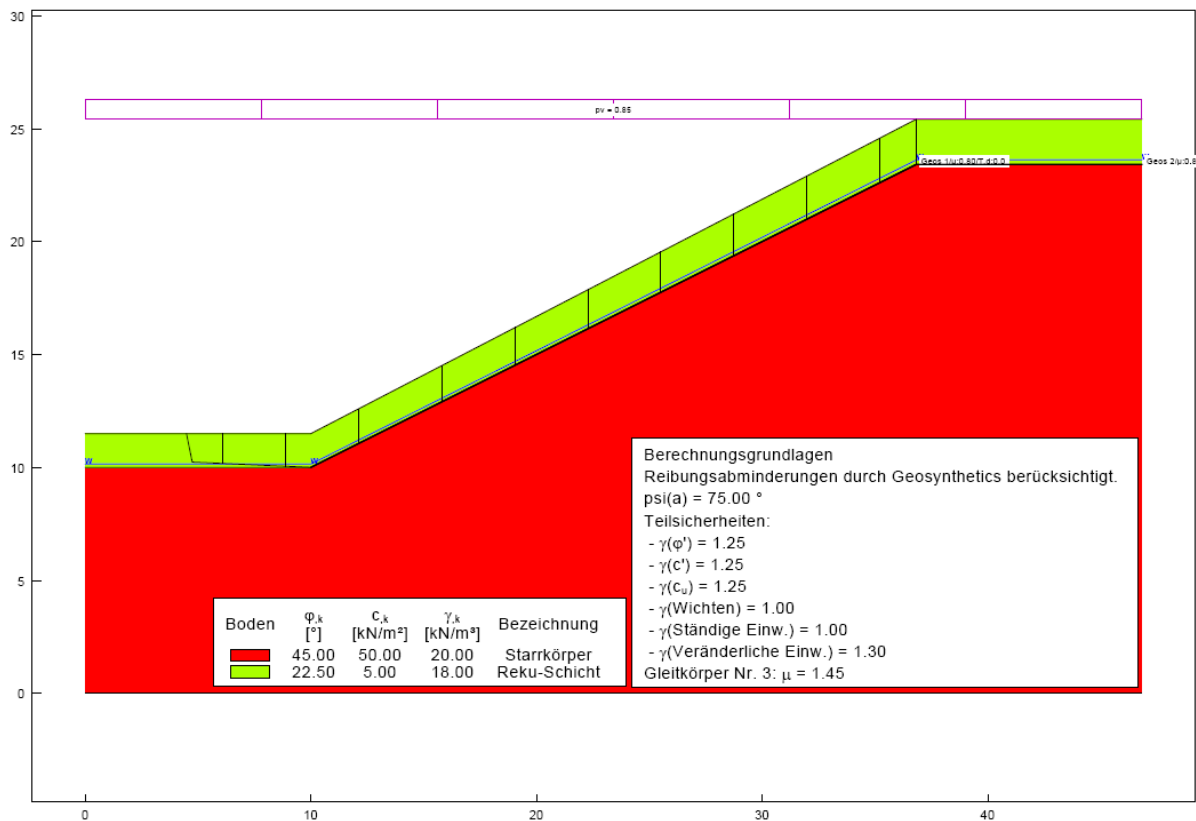
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Schluff

Böschungsneigung: 1:2 (26,75°)

Böschungslänge: 30 m

Schichtmächtigkeiten: 2,0 m



Anlage 4.3-3

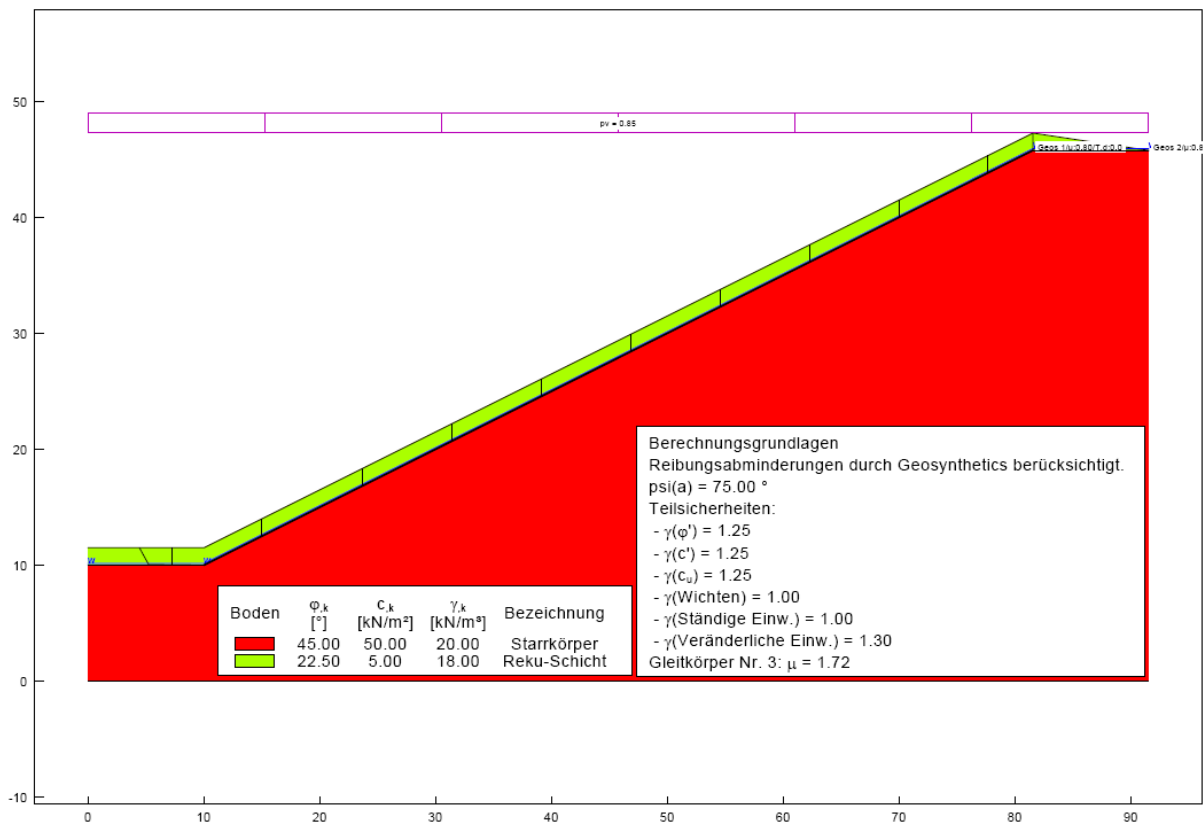
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Schluff

Böschungsneigung: 1:2 (26,75°)

Böschungslänge: 80 m

Schichtmächtigkeiten: 1,5 m



Anlage 4.3-4

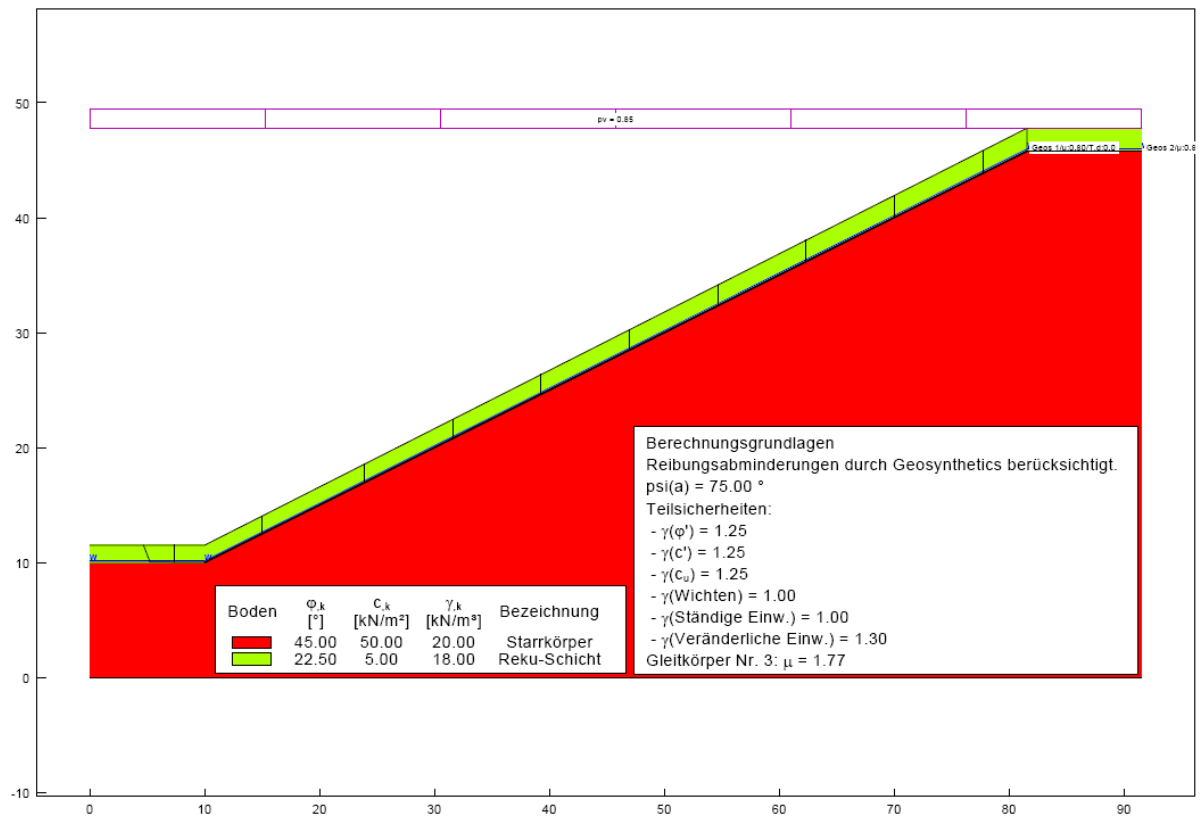
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Schluff

Böschungsneigung: 1:2 (26,75°)

Böschungslänge: 80 m

Schichtmächtigkeiten: 2,0 m



Anlage 4.3-5

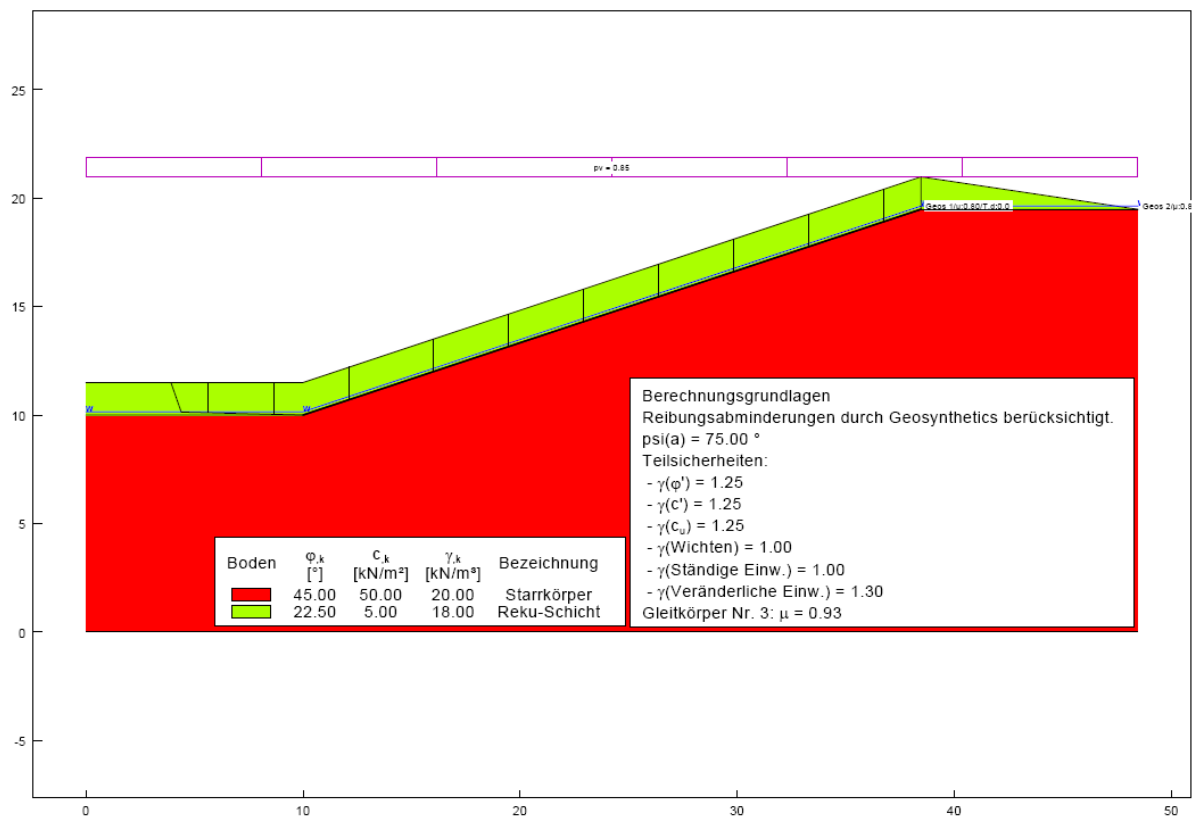
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Schluff

Böschungsneigung: 1:3 (18,64°)

Böschungslänge: 30 m

Schichtmächtigkeiten: 1,5 m



Anlage 4.3-6

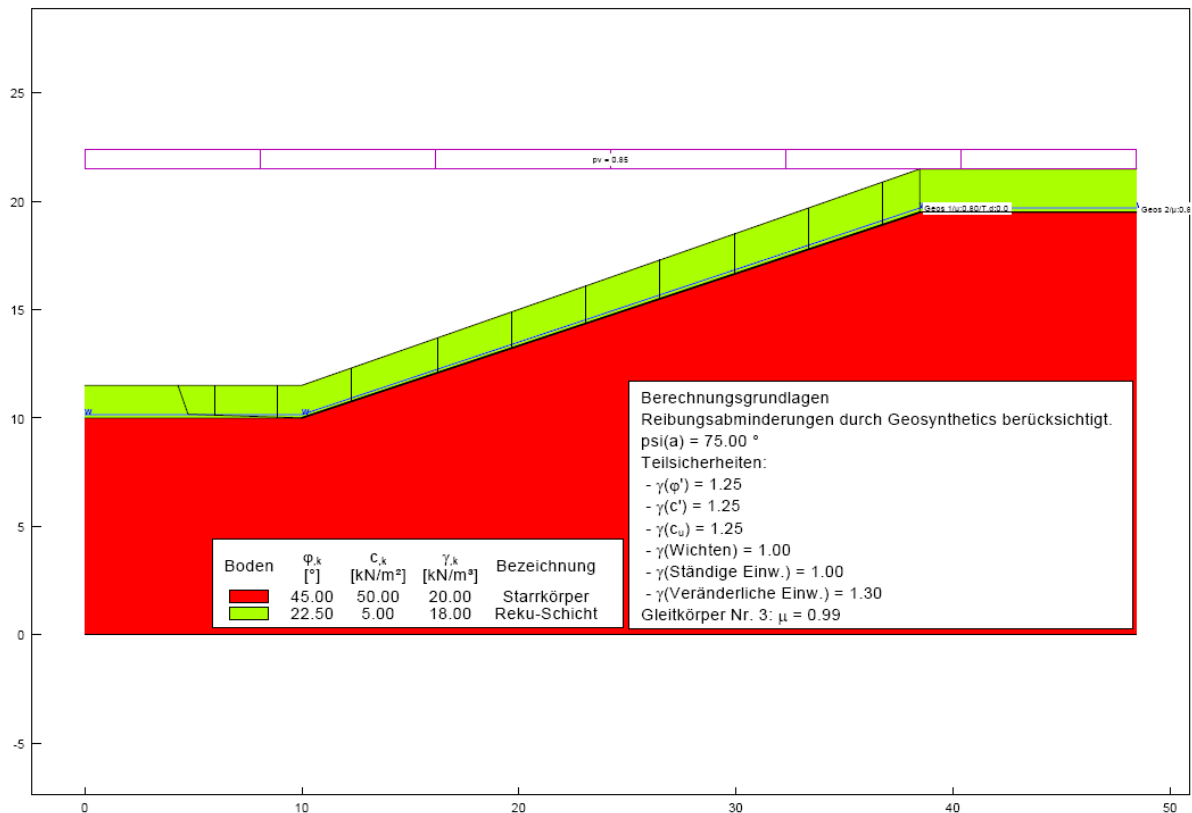
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Schluff

Böschungsneigung: 1:3 (18,64°)

Böschungslänge: 30 m

Schichtmächtigkeiten: 2,0 m



Anlage 4.3-7

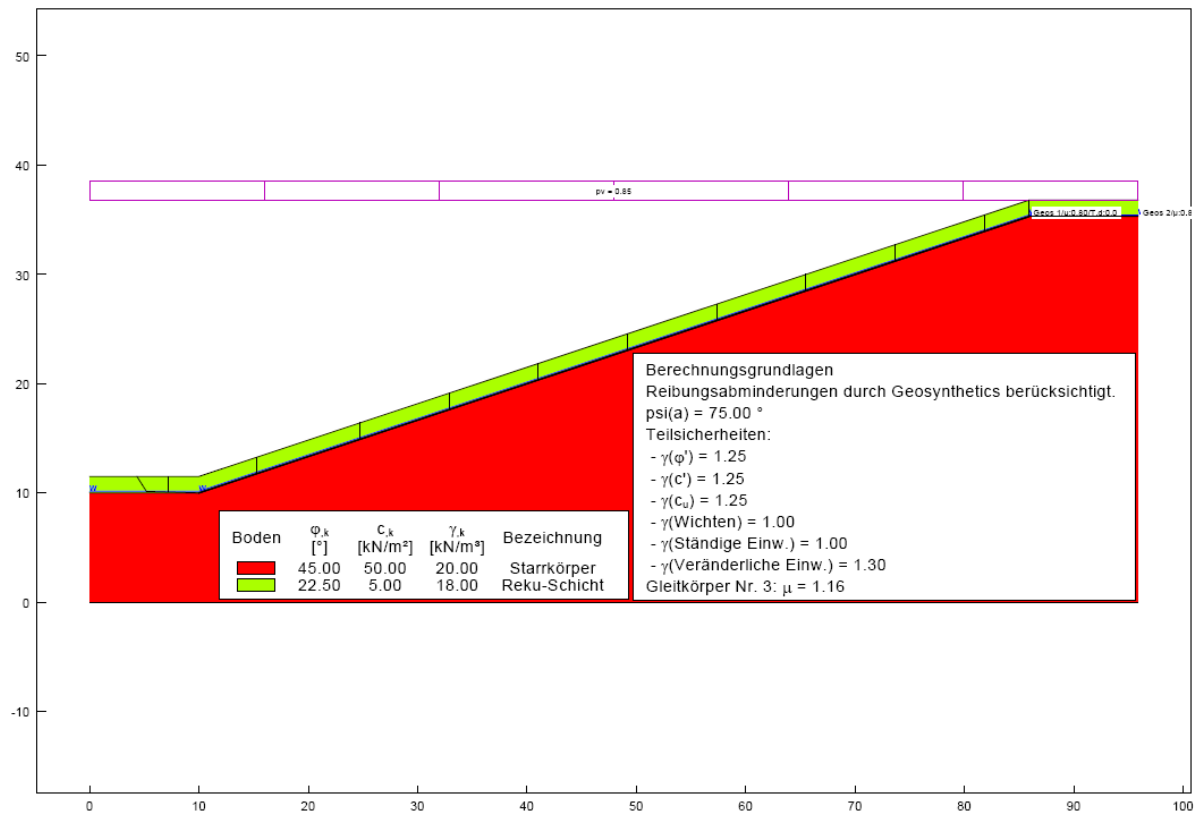
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Schluff

Böschungsneigung: 1:3 (18,64°)

Böschungslänge: 80 m

Schichtmächtigkeiten: 1,5 m



Anlage 4.3-8

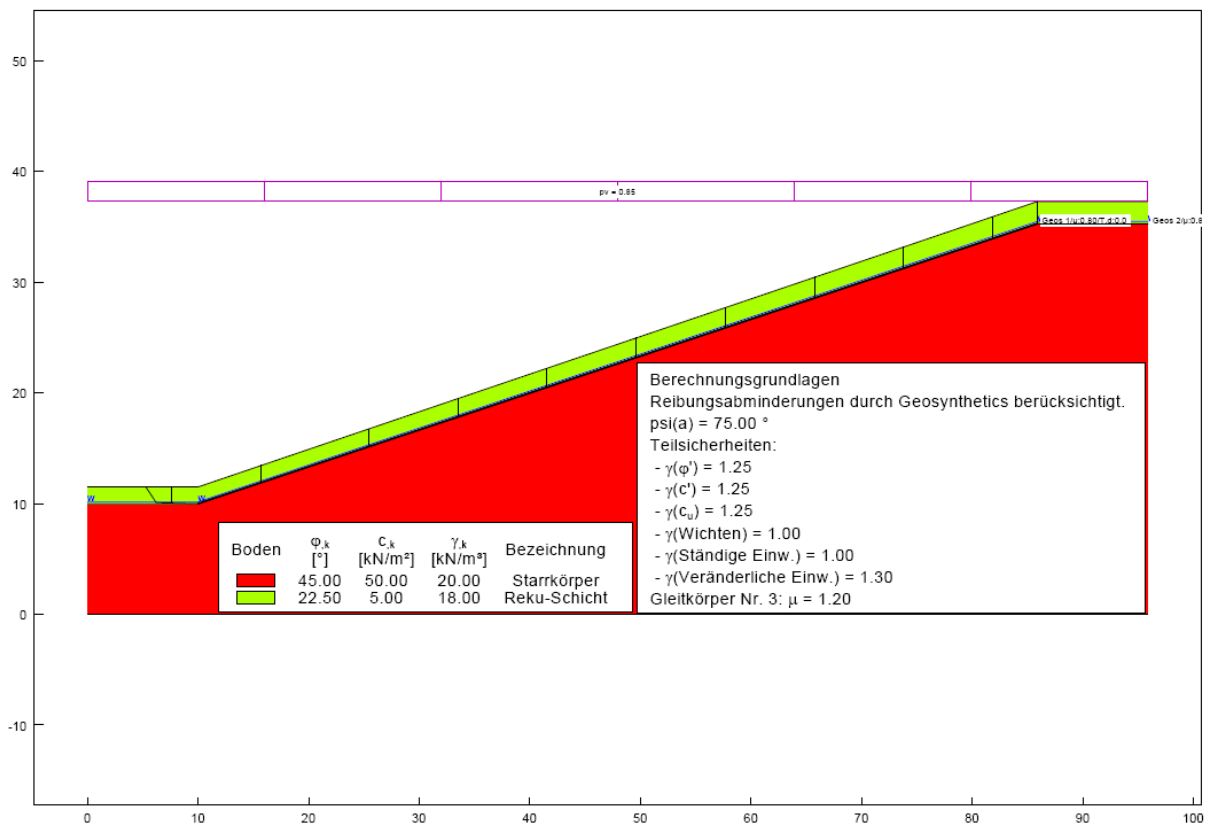
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Schluff

Böschungsneigung: 1:3 (18,64°)

Böschungslänge: 80 m

Schichtmächtigkeiten: 2,0 m



Anlage 4.4:

Bodenart: Ton

Anlage 4.4-1

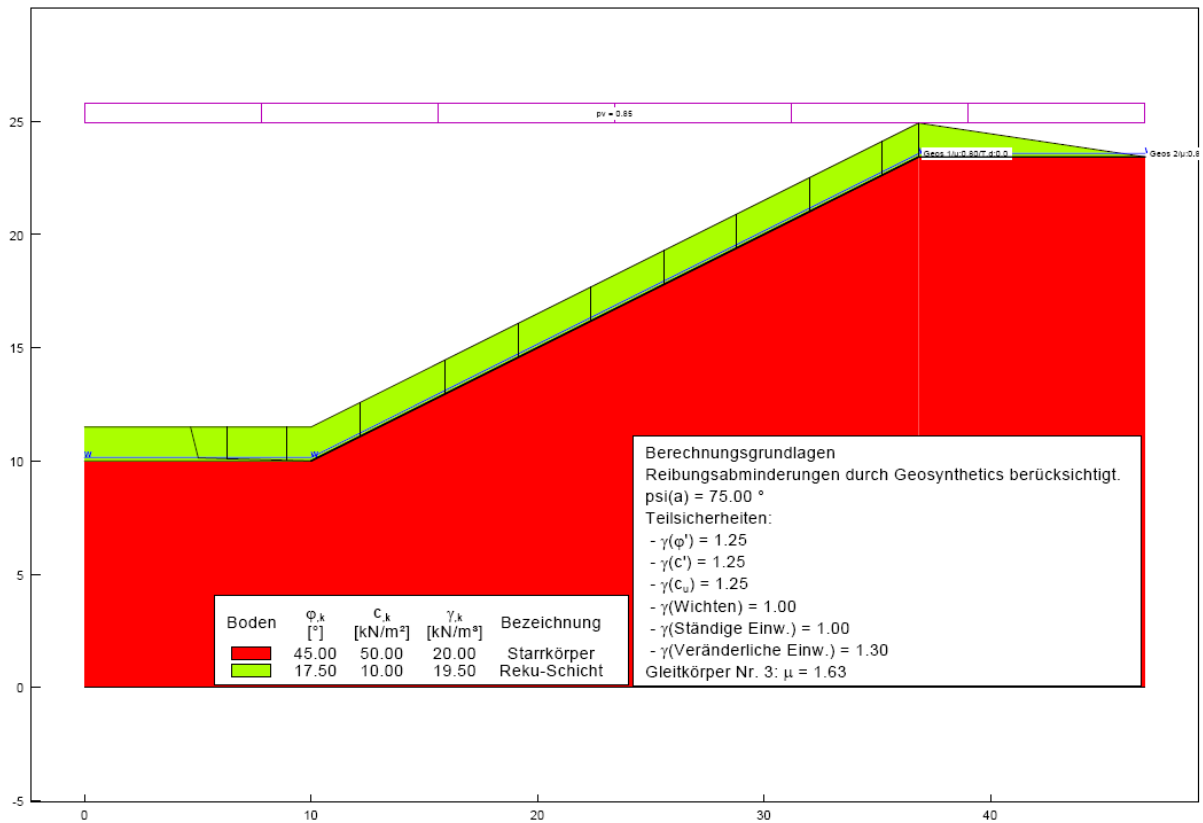
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Ton

Böschungsneigung: 1:2 (26,75°)

Böschungslänge: 30 m

Schichtmächtigkeiten: 1,5 m



Anlage 4.4-2

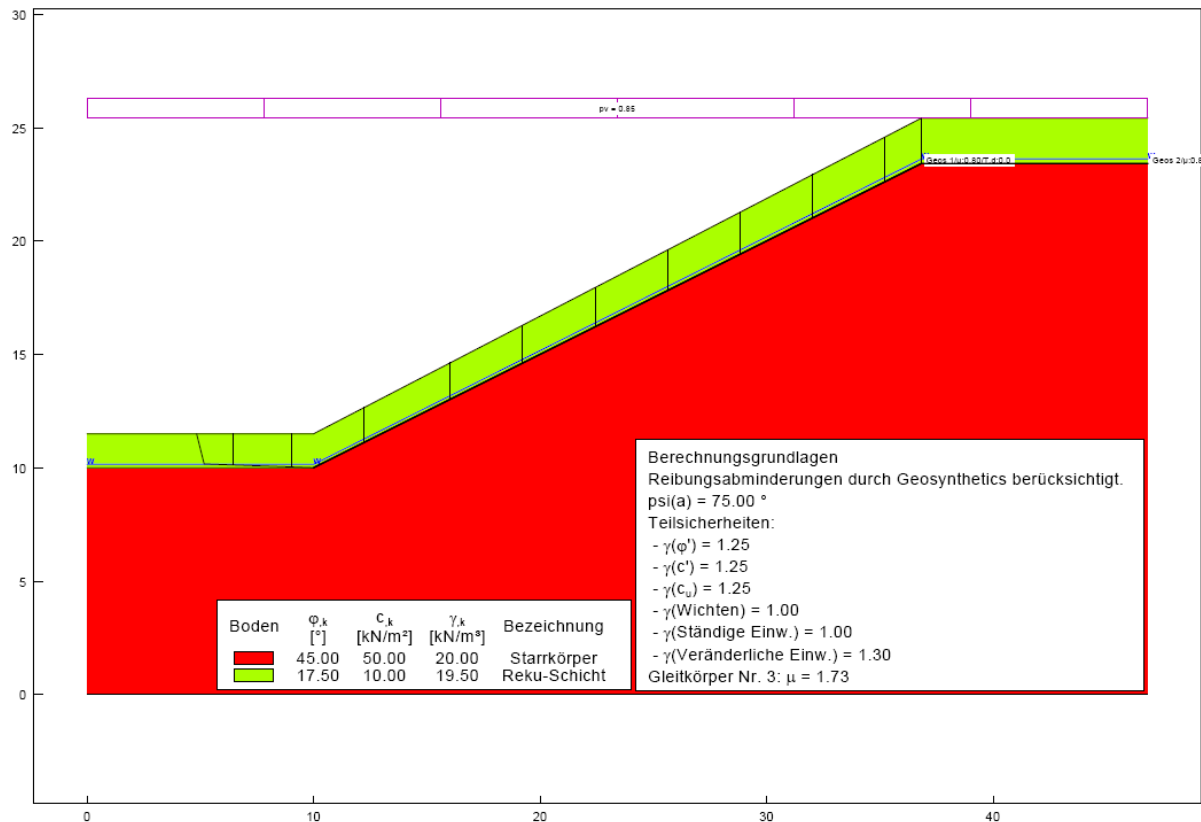
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Ton

Böschungsneigung: 1:2 (26,75°)

Böschungslänge: 30 m

Schichtmächtigkeiten: 2,0 m



Anlage 4.4-3

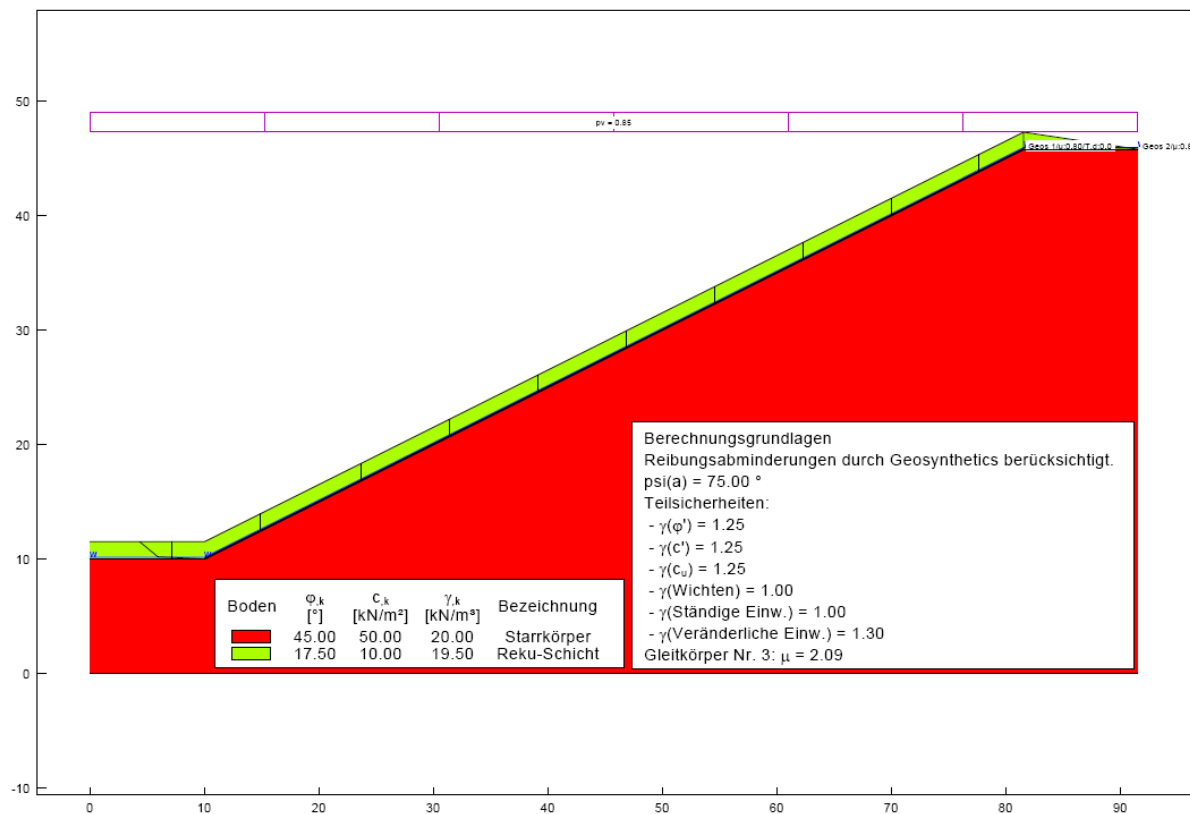
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Ton

Böschungsneigung: 1:2 (26,75°)

Böschungslänge: 80 m

Schichtmächtigkeiten: 1,5 m



Anlage 4.4-4

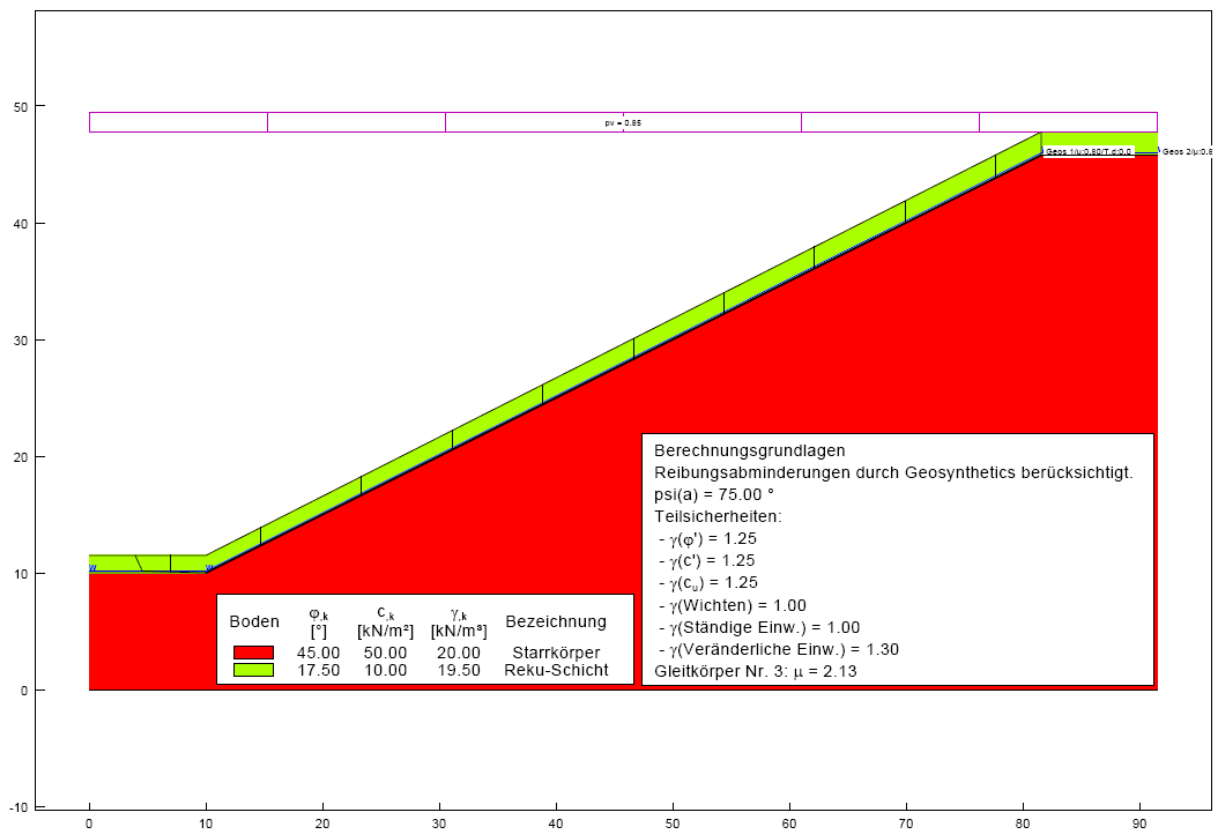
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Ton

Böschungsneigung: 1:2 (26,75°)

Böschungslänge: 80 m

Schichtmächtigkeiten: 2,0 m



Anlage 4.4-5

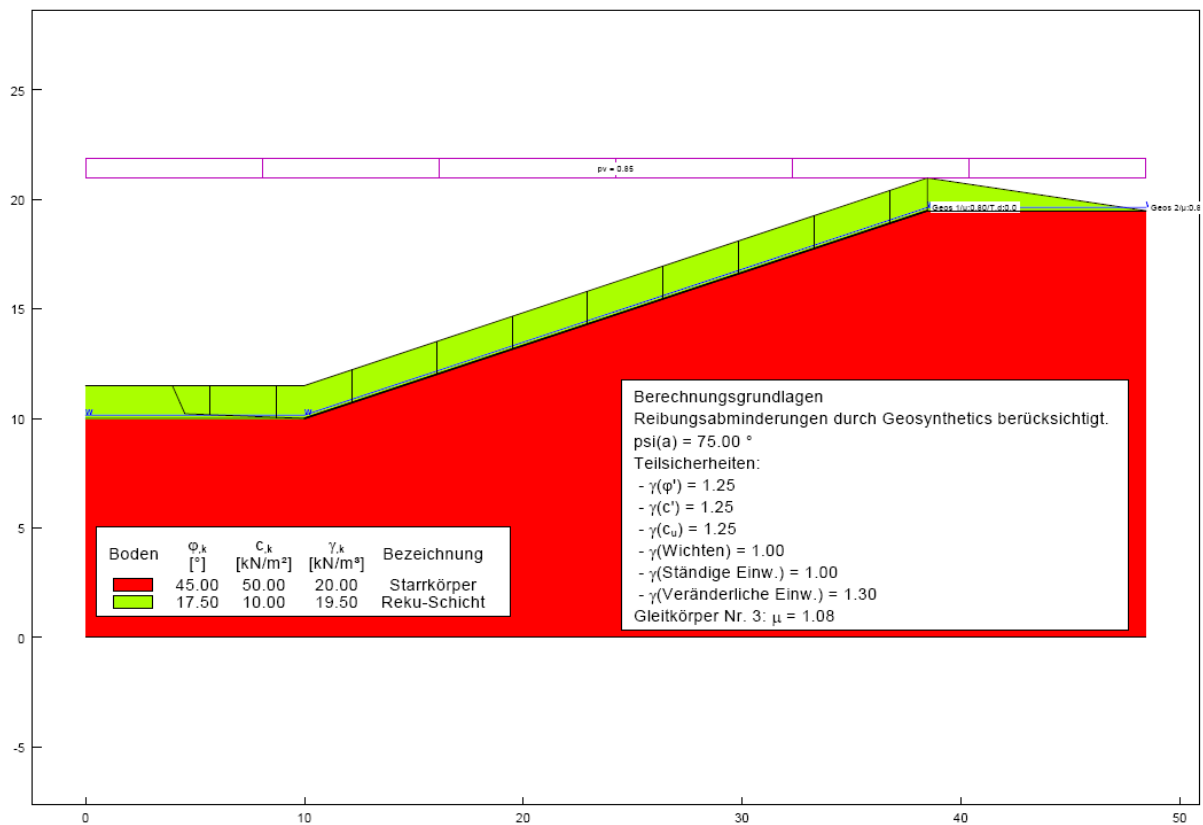
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Ton

Böschungsneigung: 1:3 (18,64°)

Böschungslänge: 30 m

Schichtmächtigkeiten: 1,5 m



Anlage 4.4-6

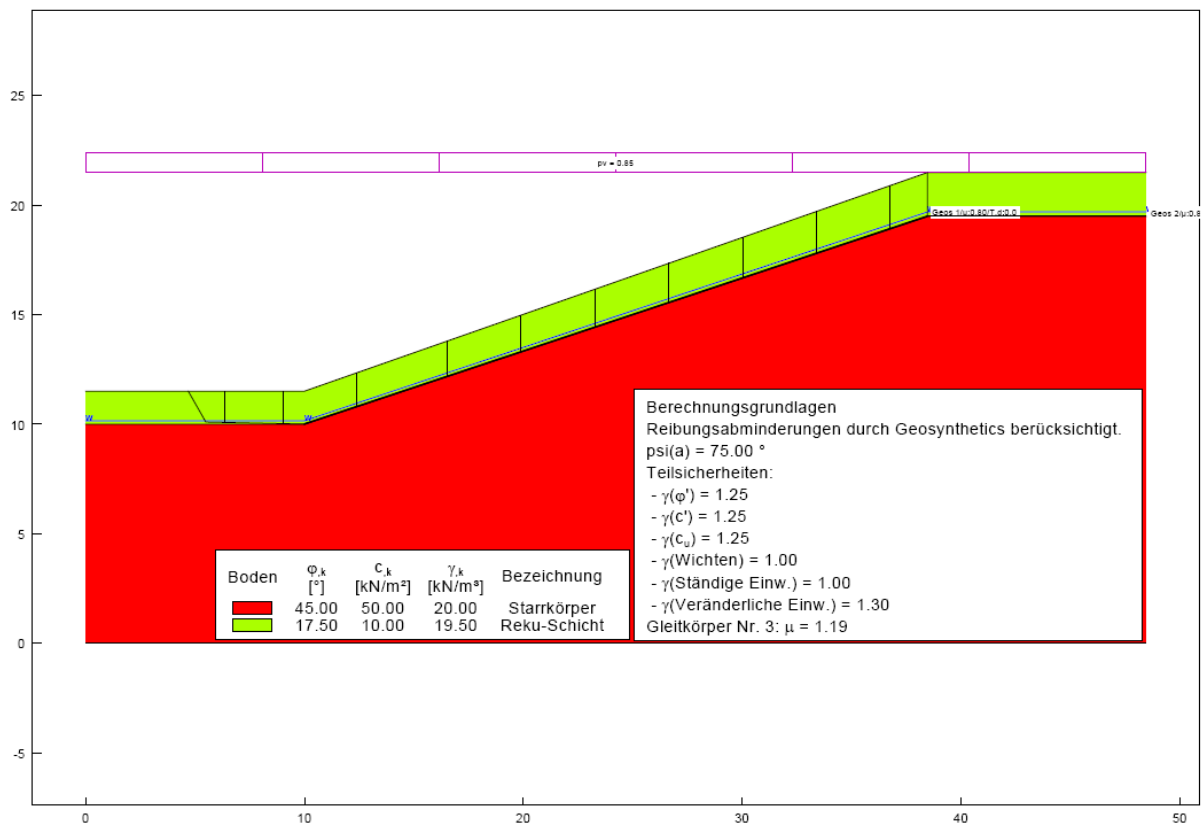
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Ton

Böschungsneigung: 1:3 (18,64°)

Böschungslänge: 30 m

Schichtmächtigkeiten: 2,0 m



Anlage 4.4-7

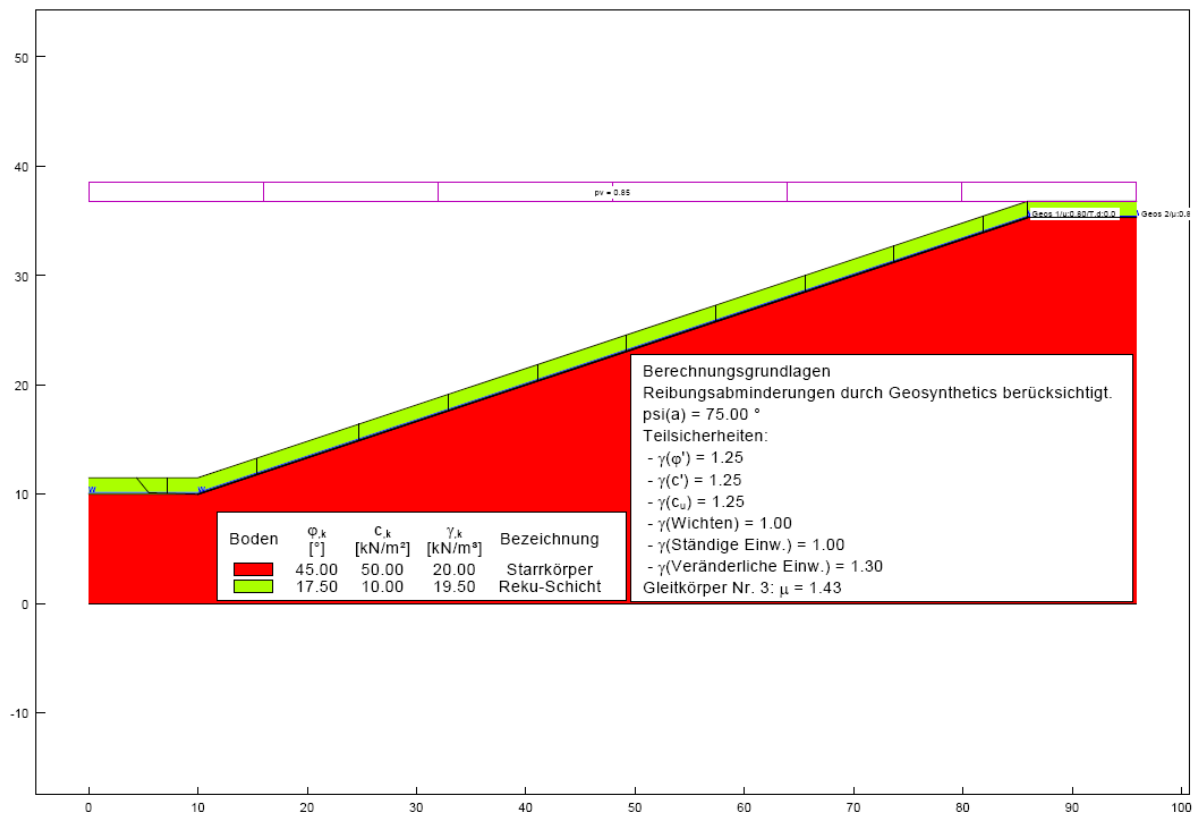
Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Ton

Böschungsneigung: 1:3 (18,64°)

Böschungslänge: 80 m

Schichtmächtigkeiten: 1,5 m



Anlage 4.4-8

Graphischer Nachweis der Standsicherheitsuntersuchung:

Bodenart: Ton

Böschungsneigung: 1:3 (18,64°)

Böschungslänge: 80 m

Schichtmächtigkeiten: 2,0 m

